



Eletroluminescência de células solares

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Marisa Santos Frazão

Dissertação orientada por:
Doutor José Almeida Silva
Professor Doutor Killian Paulo Kiernan Lobato

Agradecimentos

Os meus agradecimentos vão para todos os que direta e indiretamente tornaram possível a realização deste projeto.

Em particular, agradeço aos meus orientadores, José Silva e Killian Lobato, por todo o tempo dedicado ao meu trabalho e pelos preciosos conselhos que me deram.

À Open Renewables e Air Liquide pelas células solares fornecidas, sem as quais não teria sido possível a realização deste projeto.

À professora Olinda Monteiro, do departamento de química, por disponibilizar o uso do espectrofotómetro na realização das medidas de refletância.

Ao Ricardo Pereira pela ajuda facultada no trabalho de oficina.

À Sara Costa pela ajuda e partilha de ideias na aquisição das imagens termográficas.

Ao Ivo Costa, Ivo Bernardo e restantes pessoas que me ajudaram e partilharam o espaço no Laboratório de Aplicações Fotovoltaicas.

A nível pessoal, a todos os meus amigos e colegas pelo companheirismo e apoio ao longo dos últimos anos.

Por fim, mas não menos importante, aos meus pais, irmão, avó e restante família que me apoiaram sempre incondicionalmente em todo este percurso académico.

A todos, muito obrigada!

Resumo

A eletroluminescência é uma técnica utilizada na identificação de defeitos nas células solares fotovoltaicas. Esta dissertação foca-se na detecção e padronização de defeitos visíveis nas imagens EL e ReBEL de células de silício mono e multicristalino. Para o efeito, foi desenvolvido um sistema experimental baseado no uso de uma câmara Si-CCD de baixo custo. O novo sistema foi validado através da comparação das imagens EL e ReBEL obtidas com uma câmara CCD de alta sensibilidade, especialmente desenvolvida para sistemas de eletroluminescência.

Nas medidas EL foi aplicada uma tensão próxima à de V_{OC} enquanto que nas ReBEL foi feito um varrimento de tensões entre os -4 V e -18 V, possibilitando a identificação de diferentes tipos de defeitos. As imagens obtidas permitiram a detecção de defeitos como fissuras, curto-circuitos, contaminações com metais e interrupções na metalização frontal. De forma complementar, foi feita a comparação das imagens EL e ReBEL com outras técnicas de caracterização: curvas I-V, resposta espectral e termografia. Estas permitiram um estudo mais aprofundado sobre a origem de alguns dos defeitos detetados.

O presente documento valida ainda o método de detecção de defeitos via variação de temperatura em células de silício multicristalino, no qual se efetua a subtração das imagens EL de uma célula a temperaturas diferentes. Por último, deu-se início ao estudo de introdução de defeitos por PID (*potential induced degradation*) que resulta em perdas na potência gerada pelo módulo, induzidas por uma diferença de potencial.

Palavras-chave: Células solares, eletroluminescência, detecção de defeitos, técnicas de caracterização.

Abstract

Eletroluminescence (EL) is a method used for identification of PV solar cells defects. This thesis focuses on the detection and standardization of visible defects by EL and ReBEL imaging on both mono and multicrystalline silicon solar cells. For this purpose, an experimental system was developed based on a low cost Si-CCD camera. The new system has been validated by comparing EL and ReBEL imaging obtained with a high sensitivity CCD camera specially developed luminescence detection.

EL measurements were performed with a bias voltage near V_{OC} , whereas ReBEL measurements were taken into a voltage range between -4V to -18V, thus allowing for the identification of different defect types. The imaging obtained allows defect detecting such as cracks, shunts, metal contamination and metal contact failures. Complementarily, EL and ReBel imaging were compared with other characterization techniques: I-V curves, spectral response and termography. These allowed a deeper study about the origin of the detected defects.

Besides, this document validates the defect detection method through variation of temperature gradient on multicrystalline silicon solar cells, by deducting EL images of a certain cell at different temperatures. Finally, the PID (*potential induced degradation*) study was introduced, which results on the module power losses, induced by a potencial difference.

Key words: solar cells, eletroluminescence, defect detection, characterization techniques.

Índice

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	iii
Abstract	iv
Índice de Figuras	vii
Índice de Tabelas.....	x
Simbologia e Notações.....	xi
1 Introdução	1
1.1 Contexto	1
1.2 Enquadramento e objetivos	2
1.3 Estrutura do documento	3
2 Fundamentos teóricos de células solares.....	5
2.1 Semicondutores	5
2.1.1 Materiais semicondutores.....	5
2.1.2 Interação com a radiação.....	7
2.2 Junção p-n	9
2.3 Recombinação	9
2.3.1 Mecanismos de recombinação.....	9
2.3.2 Tempos de vida	13
2.3.3 Comprimentos de difusão.....	14
2.4 Células solares.....	14
2.4.1 Estrutura típica de uma célula solar de silício cristalino	14
2.4.2 Circuito equivalente	15
2.4.3 Perdas e defeitos em células solares.....	17
3 Caracterização das células solares.....	23
3.1 Curvas I-V	23
3.1.1 Curva I-V iluminada.....	23
3.1.2 Curva I-V no escuro	25
3.1.3 Suns-Voc	26
3.2 Resposta espectral e rendimento quântico.....	27
3.2.1 Eficiência quântica externa	28
3.2.2 Eficiência quântica interna	29
3.2.3 Refletância.....	29
3.2.4 Comprimento difusão dos portadores minoritários	29
3.3 Eletroluminescência	30
3.3.1 Sistema experimental desenvolvido	32

3.4	Termografia.....	37
4	Procedimento e Resultados experimentais	39
4.1	Identificação de defeitos.....	40
4.2	Identificação de defeitos via variação de temperatura em células solares multicristalina	54
5	Conclusões e trabalhos futuros.....	57
6	Referências bibliográficas	59
	Anexos.....	63
	A.1: Introdução de defeitos por PID	63
	A.2: Refletância da amostra de referência.....	64
	A.3: <i>Software</i> da câmara CoolSamBa HR320.....	66
	A.4: Gráficos de refletância das amostras estudadas	68

Índice de Figuras

Figura 1-1: Potencial energético das FER's. Adaptado de Chu, 2011 [3].	1
Figura 1-2: Espectro solar.	2
Figura 2-1: Comparação da estrutura das bandas de energia para isolantes, semicondutores e condutores. As áreas a branco simbolizam zonas livres de eletrões e a cinza zonas preenchidas por eletrões.	5
Figura 2-2: Representação esquemática da estrutura do diamante. a_0 corresponde ao parâmetro de rede que para o silício assume o valor de $5,431 \text{ \AA}$ [7].	6
Figura 2-3: Estrutura cristalina do silício (a) monocristalino e (b) multicristalino [8].	7
Figura 2-4: Diagrama simplificado da absorção de fotões num semicondutor de hiato direto (a) e hiato indireto (b). Em (a) representa-se a incidência de um fotão com energia $h\nu = E_2 - E_1 > E_G$. Em (b) está esquematizada a absorção de um fotão com energia inferior e outro com energia superior a $E_2 - E_1$, sendo a energia e o momento conservados pela absorção e emissão de um fonão. Adaptado de Gray, 2013 [4].	8
Figura 2-5: Coeficiente de absorção para o Si e para o GaAs em função da energia do fotão a 300 K [4].	8
Figura 2-6: Esquema representativo da junção p-n. Adaptado de Circuits Today, 2014 [10].	9
Figura 2-7: Tipos de recombinação em volume: (a) Recombinação de SRH; (b) Recombinação radiativa; (c) Recombinação de Auger.	10
Figura 2-8: Esquema representativo dos estados criados à superfície de um semicondutor ou na interface entre dois materiais diferentes [4].	12
Figura 2-9: Comparação dos três tipos de recombinação em volume relativamente aos tempos de vida numa célula solar de silício do tipo-p [11].	14
Figura 2-10: Estrutura típica de uma célula solar de silício do tipo-p.	15
Figura 2-11: Modelo de um díodo de uma célula solar fotovoltaica.	16
Figura 2-12: Modelo de dois díodos para uma célula solar fotovoltaica.	16
Figura 2-13: Tipos de perdas em células solares [5, 11].	17
Figura 2-14: Relação entre a energia do espectro solar (AM 1.5) e a energia máxima que uma célula solar de silício consegue absorver. Adaptado de Glunz et al., 2012 [14].	18
Figura 2-15: Exemplo de imagens de EL com possíveis defeitos em células solares: a) fissuras, b) rutura nos contatos frontais, c) heterogeneidade dos cristais de silício, d) defeito na metalização traseira, e) defeito na metalização frontal, f) Curto-circuito na <i>busbar</i> , g) Curto-circuito local [17, 18].	19

Figura 2-16: Esquema proposto do impacto do PID numa célula solar. Formação de uma dupla camada de cargas e consequente curto-circuito da junção p-n. Adaptado de Bauer et al.,2012 [21].	20
Figura 3-1: Comportamento típico da curva I-V iluminada e no escuro, para uma célula do tipo-p.	23
Figura 3-2: Impacto da resistência série (à esquerda) e da resistência de curto-circuito (à direita) na curva I-V iluminada de uma célula solar [4].	24
Figura 3-3: Sistema de aquisição de curvas I-V iluminadas.	25
Figura 3-4: Curva I-V característica de uma célula solar no escuro [12].	26
Figura 3-5: Equipamento utilizado nas medidas de Suns-Voc [27].	27
Figura 3-6: Sistema experimental de resposta espectral.	27
Figura 3-7: Curva típica de EQE. Adaptado de Serra, 2014 [28].	28
Figura 3-8: Espectro de emissão típico de uma célula solar e sensibilidade de uma câmara Si-CCD [30].	31
Figura 3-9: Esquema do sistema de EL desenvolvido.	33
Figura 3-10: Face superior (esquerda) e inferior (direita) do porta-amostras.	34
Figura 3-11: Montagem com a câmara CoolSamBa HR320.	35
Figura 3-12: Interface do software da câmara Nikon D40.	36
Figura 3-13: Montagem com a câmara Nikon D40.	36
Figura 3-14: Sistema de aquisição de imagens de EL.	37
Figura 3-15: Sistema de aquisição de imagens de termografia.	38
Figura 4-1: Célula monocristalina M2. Face superior (esquerda) e inferior (direita).	39
Figura 4-2: Célula multicristalina P1. Face superior (esquerda) e inferior (direita).	39
Figura 4-3: Célula monocristalina F2. Face superior (esquerda) e inferior (direita).	40
Figura 4-4: Eletroluminescência da célula F2 (esquerda) e P1 (direita).	42
Figura 4-5: Esquema de corte com laser aplicado nas células.	43
Figura 4-6: Esquema de corte aplicado na célula F1_1.	45
Figura 4-7: Curva I-V das células F1_1a, F1_1b e F1_1c.	46
Figura 4-8: Curva I-V no escuro e gráfico logarítmico da curva I-V no escuro para as células F1_1a, F1_1b e F1_1c.	47
Figura 4-9: Curvas EQE das células F1_1a, F1_1b e F1_1c.	48
Figura 4-10: Gráfico de RQI^{-1} em função de α^{-1} para as células F1_1a e F1_1b.	48
Figura 4-11: Esquema de corte aplicado à célula F2 e destaque, à direita, da região F2_3b.	49
Figura 4-12: Curvas I-V provenientes do simulador solar e do Suns-Voc e curva EQI para dois pontos da célula F2_3b.	50
Figura 4-13: Esquema de corte aplicado à célula P1 e destaque, à direita, da região P1_1a.	51

Figura 4-14: Curvas I-V provenientes do simulador solar e do Suns-Voc e curva EQI para dois pontos da célula P1_1a.	51
Figura 4-15: Esquema de corte aplicado à célula P4 e destaque, à direita, da região P4a	52
Figura 4-16: Curvas I-V provenientes do simulador solar e do Suns-Voc e curva EQI para dois pontos da célula P4a.	53
Figura 4-17:Imagens EL da célula P5 a 21,5°C e 90°C e subtração das duas imagens.....	54
Figura 4-18: Variação da intensidade EL ao longo da linha de <i>pixéis</i> identificada na figura anterior.	55

Índice de Tabelas

Tabela 2-1: Hiato de energia de alguns materiais semicondutores [6].....	6
Tabela 4-1: Imagens de eletroluminescência e termografia de células mono e multicristalinas. Células de 156x156 mm.....	41
Tabela 4-2: Imagens EL em ambiente laboratorial vs industrial após corte com laser. Células de 78x78 mm.....	43
Tabela 4-3: Imagens EL da célula F1_1 após corte com disco diamantado. Células de 39x39 mm.....	45
Tabela 4-4: Parâmetros retirados das curvas I-V obtidas com o simulador solar e com o Suns-Voc.	46
Tabela 4-5: Correntes de saturação das células F1_1a, F1_1b e F1_1c.....	47
Tabela 4-8: Parâmetros retirados das curvas I-V da célula P1_1a.	52
Tabela 4-9: Parâmetros retirados das curvas I-V da célula P4a	53

Simbologia e Notações

α	Coefficiente de absorção
β	Fator de idealidade
Δn	Excesso de portadores minoritários
η	Rendimento da célula solar
λ	Comprimento de onda da radiação
τ	Tempo de vida dos portadores de carga
σ_n	Secção eficaz de captura dos eletrões
σ_p	Secção eficaz de captura dos buracos
$A_{célula}$	Área da célula
B	Coefficiente de recombinação radiativa
BC	Banda de condução
BV	Banda de valência
CdTe	Telureto de cádmio
c	Velocidade de propagação da luz ($2,998 \times 10^8$ m/s)
C_a	Coefficiente de recombinação de Auger para altas concentrações de portadores
C_p	Coefficiente de recombinação de Auger
D	Difusividade
E	Energia do eletrão
EQE	Eficiência Quântica Externa
EQI	Eficiência quântica Interna
EL	Eletroluminescência
E_c	Energia da banda de condução
E_f	Nível de fermi
E_g	Energia de hiato
E_v	Energia da banda de valência
FF	Fator de forma
FER	Fonte de energia renovável
GaAs	Arsenieto de gálio
Ge	Germânio
h	Constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34}$ J.s)

I	Corrente
I_0	Corrente de saturação
I_{01}	Corrente de saturação da base e do emissor
I_{02}	Corrente de saturação originada na zona de depleção da célula
I_L	Corrente fotogerada ou fotocorrente
I_{mp}	Corrente no ponto de potência máxima
I_{SC}	Corrente de curto-circuito
I_D	Corrente no díodo
I_P	Corrente na resistência paralela
InGaAs	Arsénio de gálio-índio
J_{SC}	Densidade de corrente
k_B	Constante de Boltzman ($1,381 \times 10^{-23}$ J/K)
L_e	Comprimento de difusão
m	Massa do eletrão ($9,109 \times 10^{-31}$ kg)
n	Densidade de eletrões
n_1	Concentração de equilíbrio dos eletrões quando o E_g coincide com o E_t
N_A	Número de impurezas do tipo-p
N_c	Densidade efetiva dos estados na banda de condução
N_t	Densidade dos centros de recombinação
N_v	Densidade efetiva dos estados na banda de valência
p	Densidade de buracos
p_1	Concentração de equilíbrio dos buracos quando o E_g coincide com o E_t
P_{in}	Potência incidente
P_{mp}	Potência máxima
q	Carga elementar de um eletrão ($1,602 \times 10^{-19}$ C)
R	Refletância
R_{ch}	Resistência característica
R_s	Resistência série
R_p	Resistência paralela ou de curto-circuito
ReBEL	Reverse Bias EL
Si	Silício
SiO ₂	Dióxido de silício
Si ₃ N ₄	Nitreto de silício

SR	Resposta espectral
S_n	Velocidade de recombinação de elétrons à superfície
S_p	Velocidade de recombinação de buracos à superfície
SRH	Recombinação de Shockley-Read-Hall
T	Temperatura
$U(\vec{r})$	Energia potencial periódica dentro de um semiconductor
V	Tensão
V_{mp}	Tensão no ponto de potência máxima
V_{oc}	Tensão em circuito aberto
v_{th}	Velocidade térmica dos portadores de carga
W	Espessura da <i>wafer</i>

1 Introdução

Esta secção introduz e descreve o tema do trabalho bem como os objetivos a que se propõe cumprir. É apresentado o contexto em que se insere a temática do projeto e descrito o enquadramento em que foi realizado. Por fim, é apresentada a estrutura do documento.

1.1 Contexto

Nos últimos anos, tem-se vindo a verificar a nível mundial um aumento da potência instalada e da produção de energia elétrica a partir de fontes de energia renováveis (FER). Segundo a Associação de Energias Renováveis, APREN, o forte investimento que tem sido feito nestas energias traduziu-se, no período de 2010 a 2013, num aumento de 31% (crescimento médio anual de 9,5%) da potência mundial instalada para produção de eletricidade a partir destas fontes. Até 2030 prevê-se ainda a quase duplicação da potência instalada proveniente das FER's com um crescimento médio anual de 4,1% [1].

No que diz respeito à produção de eletricidade, as FER em 2014 representavam cerca de 22% do *mix* energético mundial (62% no contexto nacional [2]) prevendo-se um crescimento de 40% até 2030, suportando assim cerca de 29% da produção de energia elétrica mundial [1].

Entre as diversas fontes renováveis, a energia que provém diretamente do sol é a que apresenta o maior potencial energético (Figura 1-1), fazendo dele a maior fonte de energia renovável do planeta.

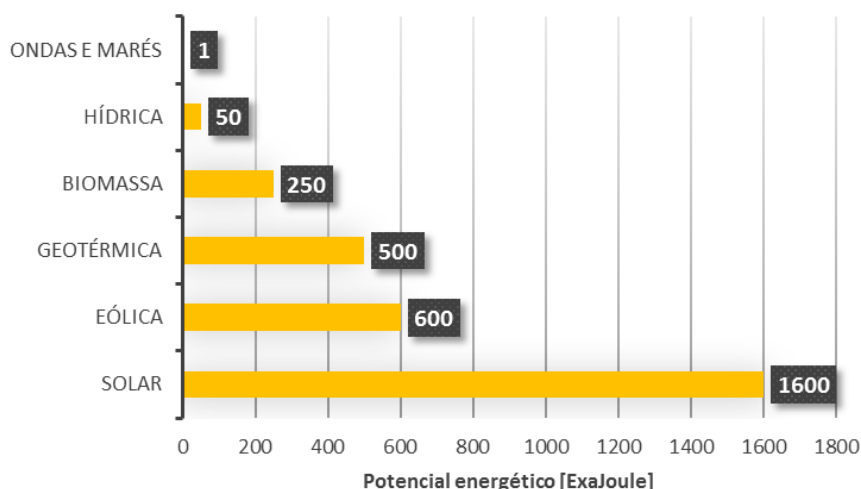


Figura 1-1: Potencial energético das FER's. Adaptado de Chu, 2011 [3].

Com o objetivo de aproveitar este potencial disponível, existem várias tecnologias, como a solar térmica e a solar fotovoltaica, capazes de converter a energia proveniente do sol em energia elétrica. Apenas cerca de 3% da produção de eletricidade a nível mundial teve, em 2014, a sua origem no recurso solar (1% em contexto nacional [2]), no entanto, esta é uma das áreas com maior crescimento previsto até 2030, estimando-se que nesse ano represente 8% do consumo (5% no contexto nacional) [1].

A superfície do Sol tem uma temperatura aproximada de 5760 K. A radiação emitida pelo Sol tem um espectro aproximado ao de um corpo negro a essa temperatura. De toda a energia gerada pelo sol, aquela que importa aproveitar é a incidente na superfície da terra. Ao atravessar a atmosfera a radiação solar sofre uma atenuação (visível na Figura 1-2) provocada pela presença dos seus gases constituintes, como o ozono (O_3), o oxigénio (O_2), o dióxido de carbono (CO_2) e o vapor de água

(H₂O). Esta atenuação depende do comprimento do percurso feito pela radiação através da atmosfera e da nebulosidade encontrada.

O espectro correspondente à radiação incidente no topo da atmosfera denomina-se AM0, uma vez que a massa de ar (AM) atravessada pela radiação solar nesta posição toma o valor de zero. Quando a radiação é medida junto à superfície terrestre, a massa de ar atravessada varia com o ângulo de incidência em relação à superfície terrestre. O coeficiente massa de ar é dado por:

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta)} \quad (1)$$

Sendo θ o ângulo zenital.

O espectro AM1.5 (Figura 1-2) corresponde ao modelo de espectro mais utilizado no estudo das células solares, normalizado a uma densidade de potência de 1 kW/m² [4].

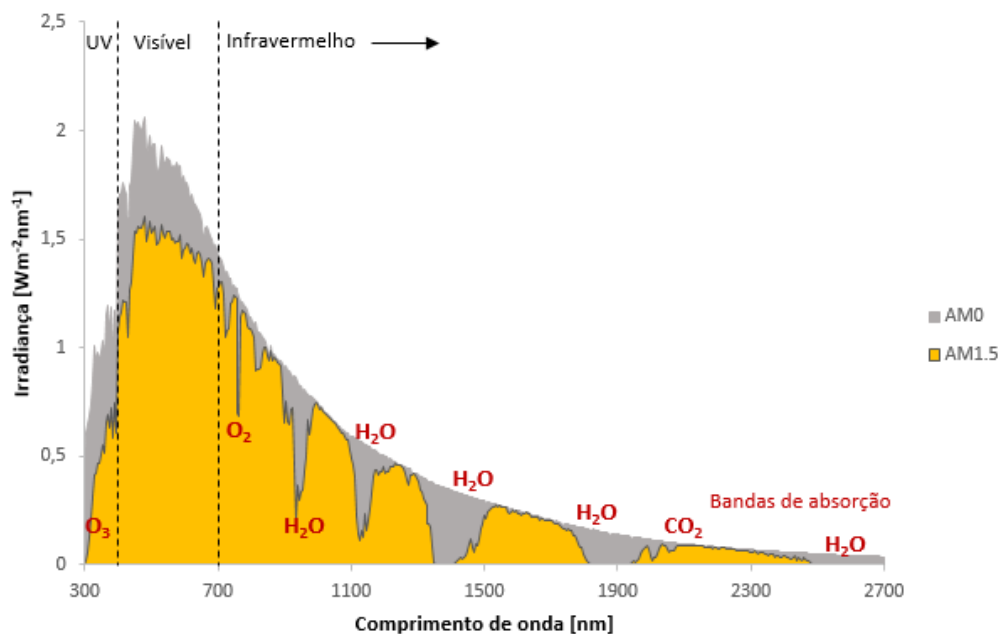


Figura 1-2: Espectro solar.

1.2 Enquadramento e objetivos

A energia solar fotovoltaica surge como uma das formas mais aceites de conversão da energia solar em energia elétrica devido ao reconhecimento do seu potencial como fonte de energia não poluente e à necessidade de controlo das emissões de dióxido de carbono. Nos últimos anos têm-se observado uma forte aposta no estudo e desenvolvimento da tecnologia, por forma a torná-la mais eficiente e com custos mais reduzidos. Tornou-se assim fundamental o desenvolvimento de técnicas de caracterização que permitam avaliar o funcionamento dos sistemas antes e durante a sua operação, de modo a manter a qualidade dos mesmos. Este trabalho tem como objetivo detetar e identificar defeitos que possam surgir durante o fabrico e utilização das células solares (elemento principal dos sistemas fotovoltaicos) através da técnica de eletroluminescência. Para tal, é objetivos desta dissertação o desenvolvimento de um sistema de caraterização de eletroluminescência de baixo custo, de células de dimensão industrial. O estudo de identificação de defeitos complementa-se com a comparação com outras técnicas de caracterização: curvas I-V, resposta espectral e termografia. Pretende-se ainda dar início ao estudo de introdução de defeito por PID (*potential induced*

degradation) que resulta em perdas na potência gerada pelo módulo, induzidas por uma diferença de potencial. Este objetivo acabou por não ser atingido devido a avarias no material de laboratório.

1.3 Estrutura do documento

O documento encontra-se estruturado em seis secções. A presente secção introduz o tema em estudo bem como os objetivos e a descrição da problemática em que se insere esta dissertação.

A secção dois descreve os fundamentos teóricos das células solares, na qual se apresentam e descrevem alguns defeitos que podem ser detetados nas imagens de eletroluminescência, nomeadamente o PID.

Na secção três, são descritas as técnicas de caracterização utilizadas na parte experimental desta dissertação. É apresentado tanto a componente teórica como a descrição de cada sistema utilizado, nomeadamente o desenvolvimento do sistema de medida de eletroluminescência.

Na secção quatro, são apresentados os resultados obtidos do estudo de identificação de defeitos e do estudo de identificação de defeitos via variação de temperatura em células de silício multicristalino. Todos os estudos tiveram por base a eletroluminescência.

Na secção cinco, são apresentadas as conclusões e trabalhos futuros e na secção seis finaliza-se com as referências bibliográficas.

2 Fundamentos teóricos de células solares

Esta secção aborda os conceitos base e o estado da arte dos temas relevantes para este projeto. O capítulo apresenta-se dividido em quatro secções, nas quais são descritos os princípios básicos dos semicondutores, o processo de criação da junção P-N e os mecanismos de recombinação que ocorrem numa célula solar. Na última secção, é apresentado o modelo da célula e enumeradas as perdas e defeitos que estas apresentam.

2.1 Semicondutores

A conversão direta de luz em energia elétrica requer sempre a presença de um material semicondutor. Estes podem derivar de uma de duas categorias: substâncias amorfas ou substâncias cristalinas. No primeiro caso, a estrutura dos átomos e moléculas não apresenta, de um modo geral, uma distribuição periódica ou regular. Por outro lado, os sólidos cristalinos distinguem-se pela periodicidade perfeita, ou quase perfeita, da sua estrutura atómica. Torna-se, portanto, muito mais fácil de entender e descrever a física por detrás dos semicondutores cristalinos, sendo sobre estes que recai a explicação sobre os princípios físicos fotovoltaicos desta dissertação.

2.1.1 Materiais semicondutores

Os semicondutores pertencem a uma das três possíveis classificações atribuídas aos materiais em relação à sua condutividade: condutores, semicondutores e isolantes. A grande diferença entre estes três tipos de materiais encontra-se na distância entre a banda de valência (BV) e a banda de condução (BC), tal como ilustrado na Figura 2-1. Esta distância energética corresponde a uma banda proibida denominada de hiato de energia ou *bandgap* e define a energia mínima necessária para que um eletrão passe da BV para um estado livre na BC (E_g).

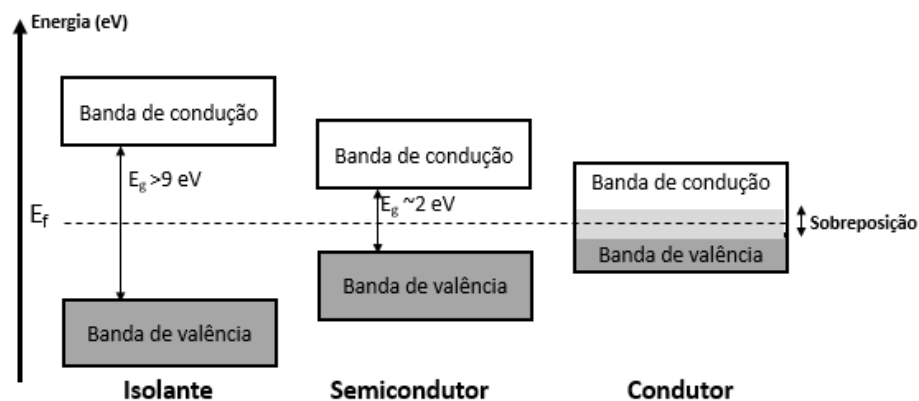


Figura 2-1: Comparação da estrutura das bandas de energia para isolantes, semicondutores e condutores. As áreas a branco simbolizam zonas livres de eletrões e a cinza zonas preenchidas por eletrões.

No caso dos metais (condutores), a BC encontra-se ocupada ou mesmo sobreposta com a BV, sendo portanto muito fácil conseguir uma corrente elétrica. Semicondutores e isolantes diferem apenas na magnitude do hiato. A temperaturas próximas do zero absoluto (0 K) um semicondutor torna-se isolante, uma vez que os eletrões não têm energia suficiente para ultrapassar o hiato de energia em direção à BC [5]. No entanto, para temperaturas superiores (inclusive à temperatura ambiente), os eletrões (n), junto ao topo da banda de valência são termicamente excitados para os

espaços vazios próximos da zona inferior da banda de condução, deixando assim lacunas na banda de valência, denominadas de buracos (p). Desta forma, um elétron vizinho pode mover-se para esse espaço vazio, produzindo um outro espaço vazio na banda de valência (o buraco). Gera-se assim um movimento contínuo de deslocamentos de elétrons e de criação de buracos. O elétron e o buraco assim criados são denominados de portadores de carga, constituindo um par elétron-buraco [4]. Nos isolantes, a distância entre a BV e a BC é consideravelmente superior à dos semicondutores, impossibilitando qualquer elétron de atravessar o hiato de energia por excitação térmica.

A tabela 2-1 apresenta valores de hiato de energia para alguns dos semicondutores mais usados na indústria do fotovoltaico.

Tabela 2-1: Hiato de energia de alguns materiais semicondutores [6].

Material	Hiato de energia E_g (eV)	
	0 K	300 K
Si	1,17	1,11
Ge	0,74	0,66
GaAs	1,52	1,43
CdTe	1,61	1,44

A meio do hiato de energia encontra-se o nível de Fermi. Para $T=0$ K, estados acima desse nível estão desocupados e abaixo estão ocupados. Quando $T>0$ K, o aumento de energia provoca a passagem de elétrons para estados acima do nível de Fermi.

Para cada semicondutor existe uma concentração intrínseca de portadores, sendo que um semicondutor sem quantidades significativas de impurezas ou puro, é denominado de intrínseco. Nestes casos, o número de buracos na banda de valência é igual ao número de elétrons na banda de condução e, como seria de esperar, a concentração de portadores aumenta com o aumento de temperatura e com a redução da energia de hiato (E_g).

Os átomos que formam os semicondutores podem vir de diferentes grupos da tabela periódica, com maior destaque para os pertencentes ao grupo IV. No entanto, os semicondutores podem surgir da combinação de elementos do grupo III com o grupo V (semicondutores III-V como o GaAs) ou ainda do grupo II com o grupo VI (semicondutores II-VI como o CdTe) [7].

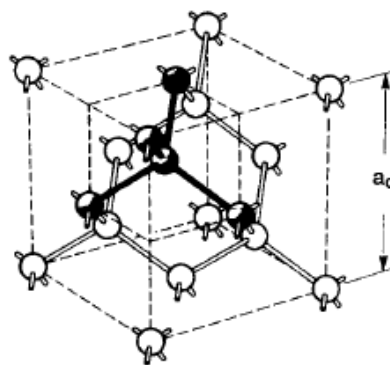


Figura 2-2: Representação esquemática da estrutura do diamante. a_0 corresponde ao parâmetro de rede que para o silício assume o valor de 5,431 Å [7].

O elemento mais utilizado na indústria das células solares é o silício. Sendo um elemento do grupo IV, apresenta 4 elétrons de valência e por isso 4 elétrons disponíveis para formar ligações covalentes com átomos vizinhos. Na sua forma cristalina, os átomos estão alinhados segundo uma rede cúbica de faces centradas do tipo diamante, numa ligação tetraédrica, como ilustrado na Figura 2-2 [4].

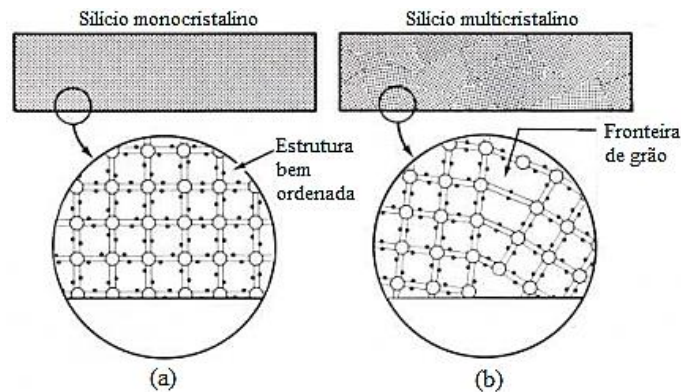


Figura 2-3: Estrutura cristalina do silício (a) monocristalino e (b) multicristalino [8].

Relativamente à orientação cristalográfica do silício cristalino, este classifica-se em monocristalino ou multicristalino (ou policristalino). No primeiro caso (figura 2-3a), todos os cristais apresentam uma mesma orientação cristalográfica, conferindo ao material um elevado grau de cristalinidade. Por outro lado, o silício multicristalino (figura 2-3b) é caracterizado pela existência de cristais com várias orientações e respetivas fronteiras de grão e outros defeitos cristalinos. Estes promovem a existência de centros de recombinação, diminuindo assim a eficiência de conversão energética das células fotovoltaicas [8].

2.1.2 Interação com a radiação

A geração de pares eletrão-buraco num semiconductor não se consegue apenas com o aumento da temperatura. Os fótons presentes na radiação que chega às células fotovoltaicas são os principais responsáveis pela geração de portadores. Estes são caracterizados por uma determinada energia, E , e comprimento de onda, λ , relacionados na equação (2):

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2)$$

Em que h corresponde à constante de Planck e c à velocidade de propagação da luz. Usualmente a energia do fóton é dada em eV através da equação (2):

$$E[eV] = \frac{1,2398 [eV \cdot \mu m]}{\lambda [\mu m]} \quad (3)$$

Os fótons podem ser absorvidos, refletidos ou transmitidos, sendo que estes dois últimos fenómenos são considerados perdas por não contribuírem para a geração de corrente elétrica.

Fótons com uma energia inferior à energia de hiato são transmitidos através da célula, passando por ela como se fosse transparente e por isso não são absorvidos. Por outro lado, fótons com energia igual ou superior ao hiato de energia, são absorvidos e irão contribuir para a formação de pares eletrão-buraco. Nestes casos, o percurso que os fótons fazem dentro do material até serem absorvidos depende do coeficiente de absorção, α , para o comprimento de onda do fóton respetivo [5].

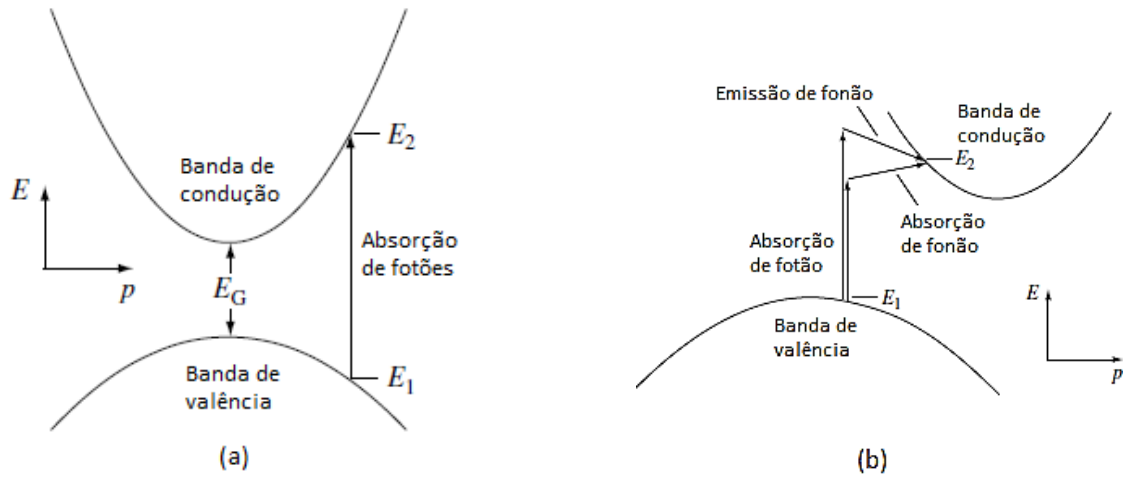


Figura 2-4: Diagrama simplificado da absorção de fótons num semicondutor de hiato direto (a) e hiato indireto (b). Em (a) representa-se a incidência de um fóton com energia $h\nu = E_2 - E_1 > E_G$. Em (b) está esquematizada a absorção de um fóton com energia inferior e outro com energia superior a $E_2 - E_1$, sendo a energia e o momento conservados pela absorção e emissão de um fonão. Adaptado de Gray, 2013 [4]

Um semicondutor diz-se de hiato direto quando o máximo da BV e o mínimo da BC ocorrem no mesmo valor de momento. Nestes casos, para que se dê a criação do par elétron-buraco basta haver a absorção de um fóton com energia igual ou superior à energia de hiato. O processo de absorção de fótons nestes semicondutores, como o arsenieto de gálio (GaAs), está representado na Figura 2-4a.

No caso do silício (Si), semicondutor de hiato indireto (Figura 2-4b), para além da absorção de um fóton com energia igual ou superior à energia de hiato, é necessário que em simultâneo seja absorvido um fonão, uma vez que o máximo da BV ocorre num valor de momento diferente do mínimo da BC. Como tal, o coeficiente de absorção não depende apenas da densidade de eletrões nos vários estágios de energia, mas também da disponibilidade de fonões (absorvidos e emitidos) com o momento certo. Assim, comparando estes semicondutores com os de hiato direto, o coeficiente de absorção é relativamente baixo e por isso a radiação penetra mais profundamente nas transições indiretas, tornando o processo de recombinação radiativo muito mais lento e menos provável, como se verá mais à frente [4]. Na Figura 2-5 é apresentada uma comparação entre os coeficientes de absorção do Si (hiato indireto) e do GaAs (hiato direto).

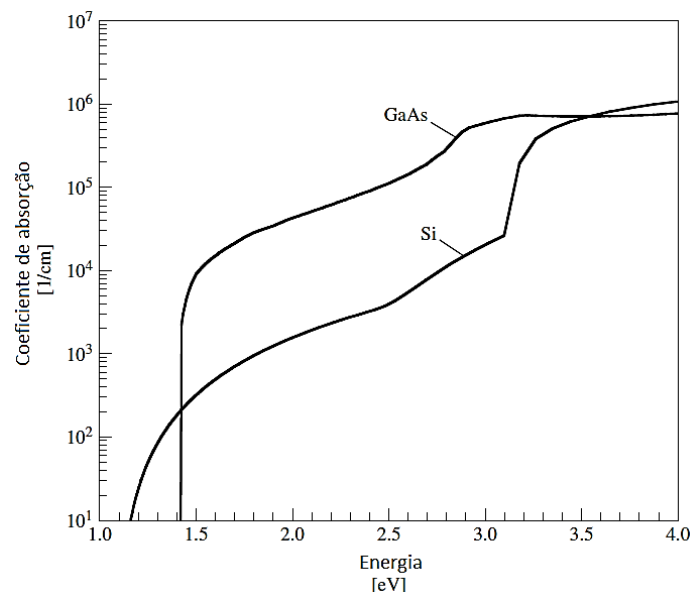


Figura 2-5: Coeficiente de absorção para o Si e para o GaAs em função da energia do fóton a 300 K [4].

2.2 Junção p-n

Numa célula fotovoltaica é comum criar-se uma junção p-n, resultante do contato entre dois semicondutores de tipos diferentes. Se a um material intrínseco adicionarmos impurezas com menos elétrons de valência, obtemos um semiconductor com um excesso de cargas livres positivas (buracos), denominado de semiconductor do tipo-p. Por outro lado, se adicionarmos impurezas com mais elétrons de valência, obtemos um semiconductor do tipo-n com um excesso de cargas negativas (elétrons). A este processo de introdução de impurezas dá-se o nome de dopagem.

Desta forma, devido à existência de um gradiente de concentrações de elétrons e buracos, gera-se uma difusão de elétrons da região n para a região p (deixando para trás íons positivamente carregados) e de buracos da região do tipo p para a região do tipo n (deixando na zona íons negativamente carregados). Na interface de união dos dois semicondutores forma-se uma zona de depleção de portadores livres, criando-se assim um campo elétrico (Figura 2-6) [9].

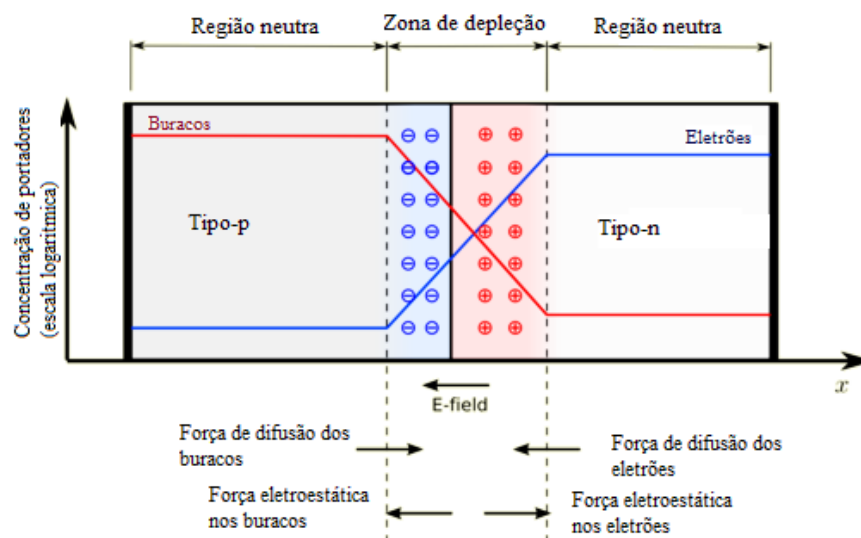


Figura 2-6: Esquema representativo da junção p-n. Adaptado de Circuits Today, 2014 [10].

Este campo elétrico é gerado por uma diferença de potencial entre as duas regiões que só permite os portadores de carga passarem de um lado para o outro num determinado sentido, uma vez que são repelidos pela região de carga com a mesma polaridade.

2.3 Recombinação

Uma vez criado um excesso de portadores de carga num semiconductor, através da absorção de luz e/ou injeção de corrente, este fica em desequilíbrio termodinâmico [4]. Nesta altura, após a fonte (de luz ou corrente) ser desligada, a concentração de elétrons (n) e de buracos (p) tende a estabilizar decaindo assim o excesso de portadores num processo denominado recombinação [5].

2.3.1 Mecanismos de recombinação

A recombinação pode ocorrer no volume (*bulk*) da célula ou na sua superfície. Dentro da recombinação em volume existem três mecanismos diferentes: Radiativa, Auger e Shockley-Read-Hall (SRH), ilustradas na Figura 2-7.

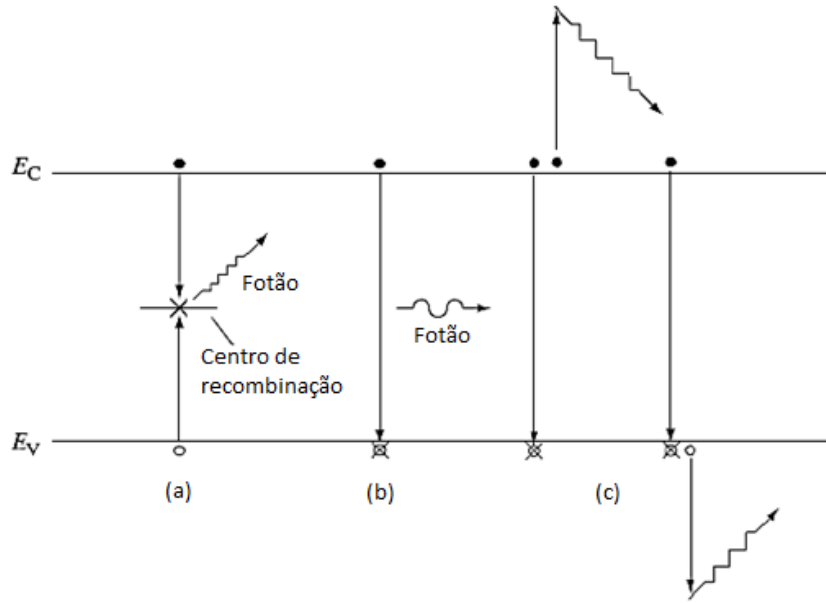


Figura 2-7: Tipos de recombinação em volume: (a) Recombinação de SRH; (b) Recombinação radiativa; (c) Recombinação de Auger.

Recombinação radiativa

A recombinação radiativa (ou banda-a-banda) ocorre quando os elétrons voltam da banda de condução para a banda de valência emitindo um fóton, suprimindo o mesmo número de buracos. Sendo o processo inverso da absorção, a energia do fóton emitido corresponde aproximadamente à energia do hiato [5].

Este tipo de recombinação é um processo dominante nos semicondutores de hiato direto. No entanto, em semicondutores indiretos, a exigência da emissão simultânea de um fóton e fonão de modo a haver conservação do momento e da energia, torna este processo mais improvável de ocorrer [11].

A taxa de recombinação radiativa é influenciada tanto pela concentração de elétrons como de buracos, uma vez que ambos são necessários para que o processo ocorra. Em materiais do tipo-p, esta taxa apresenta-se por [11]:

$$U_{rad} = B\Delta n(N_A + \Delta n) \quad (4)$$

onde Δn corresponde ao excesso de portadores minoritários (elétrons), N_A corresponde ao número de átomos dopantes do tipo-p e B corresponde ao coeficiente de recombinação radiativa. No caso do silício, o B toma o valor de $2,0 \times 10^{-15} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ [12].

O tempo de vida dos portadores, para uma recombinação radiativa [11] é dado por:

$$\tau_{rad} = \frac{1}{B(N_A + \Delta n)} \quad (5)$$

Tal como explicado anteriormente, em semicondutores de hiato indireto, para haver recombinação radiativa é necessária a presença de um elétron e de um fonão em simultâneo. É, por isso que a recombinação radiativa não tem um papel significativo nas células solares de silício.

Recombinação de Auger

A recombinação de Auger ocorre quando um par elétron-buraco cede a sua energia de recombinação a um terceiro portador, presente na banda de valência ou na banda de condução, transportando-o assim para um nível de energia superior [11]. Este elétron (ou buraco), através de uma série de colisões com a estrutura, liberta o excesso de energia emitindo um ou mais fonões, retomando ao seu estado de energia original [5]. O processo é esquematizado na Figura 2-7c.

Quanto maior for a concentração de portadores de carga, maior é a probabilidade deste tipo de recombinação ocorrer, tornando-se num mecanismo importante para altas concentrações de portadores. Sendo um mecanismo que envolve três portadores, a recombinação será proporcional a p^2n para o caso elétron-buraco-buraco e proporcional a n^2p para o caso elétron-elétron-buraco [5].

Assim, a taxa de recombinação de Auger, para materiais do tipo-p com baixa concentração de portadores, resulta da seguinte expressão [11]:

$$U_{Au} = C_p \Delta n N_A^2 \quad (6)$$

onde C_p corresponde ao coeficiente de Auger, para silício do tipo-p com baixa concentração de portadores, e toma o valor de $9,9 \times 10^{-32} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$ [11].

Os tempos de vida obtêm-se com recurso às seguintes equações:

$$\tau_{Au} = \frac{1}{C_p N_A^2} \quad \text{Baixa concentração} \quad (7)$$

$$\tau_{Au} = \frac{1}{C_a \Delta n^2} \quad \text{Alta concentração} \quad (8)$$

onde C_a assume o valor de $1,66 \times 10^{-30} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$.

Sendo um processo intrínseco, a recombinação de Auger é inevitável. No entanto, tal como referido acima, no silício este tipo de recombinação só se torna relevante para grandes concentrações de portadores de carga, como por exemplo em células sob elevada concentração de luz ou em emissores fortemente dopados [12], caso contrário este mecanismo pode ser desprezado [11].

Recombinação de Shockley-Read-Hall (SRH)

Também conhecida como recombinação via defeitos, este mecanismo resulta da presença de impurezas ou defeitos na rede cristalina dos semicondutores, criando-se assim estados de energia intermédios na banda proibida [5].

Este é o mecanismo de recombinação mais comum nas células fotovoltaicas de silício, uma vez que pode ocorrer devido à presença de defeitos e impurezas em volume mas também devido à introdução de estados à superfície, resultantes de operações de corte e polimento das *wafers* no processo de fabrico das células solares.

Este não é, portanto, um processo intrínseco e como tal pode ser minimizado ou até eliminado através da produção de um cristal de silício de estrutura e pureza perfeita [11].

A taxa de recombinação de SRH em volume é dada por [12]:

$$U_{SRH} = \frac{(np - n_i^2) v_{th} N_t}{\sigma_p^{-1}(n + n_1) + \sigma_n^{-1}(p + p_1)} \quad (9)$$

onde v_{th} e N_t correspondem à velocidade térmica dos portadores de carga (cerca de 10^7 cm/s a 300 K) e à densidade dos centros de recombinação, σ_n e σ_p representam a secção eficaz de captura

e n_1 e p_1 (definidos em baixo) são fatores estatísticos que correspondem às concentrações de equilíbrio dos elétrons e buracos quando o nível de fermi (E_f) coincide com o nível de energia onde ocorre a recombinação (E_t).

$$n_1 = N_c \exp\left(\frac{E_t - E_c}{k_B T}\right), \quad p_1 = N_v \exp\left(\frac{E_v - E_t}{k_B T}\right) \quad (10)$$

onde k_B é a constante de Boltzmann e N_c e N_v representam as densidades de estado efetivas nas bandas de condução e de valência.

Os tempos de vida dos portadores minoritários, para elétrons (τ_{p0}) e para buracos (τ_{n0}), são definidos por [12]:

$$\tau_{p0} = \frac{1}{N_t \sigma_p v_{th}}, \quad \tau_{n0} = \frac{1}{N_t \sigma_n v_{th}}, \quad (11)$$

Resultando um tempo de vida de SRH expresso por:

$$\tau_{SRH} = \frac{\tau_{n0}(p_0 + p_1 + \Delta n) + \tau_{p0}(n_0 + n_1 + \Delta n)}{(p_0 + n_0 + \Delta n)} \quad (12)$$

Recombinação de superfície

A superfície das células fotovoltaicas representa uma interface entre dois materiais ou regiões onde ocorre uma interrupção abrupta da rede cristalina do material [4]. Nesta região, ao contrário do que acontece nos centros de recombinação em volume, temos geralmente a criação de diversos estados intermédios no hiato e não apenas a criação de um estado energético [11], como se ilustra na Figura 2-8.

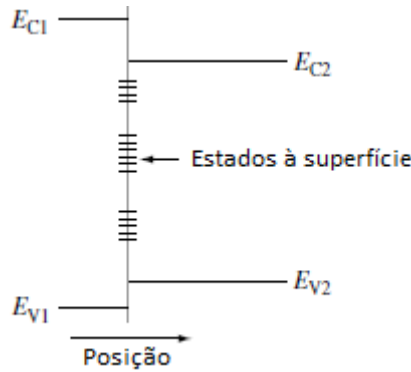


Figura 2-8: Esquema representativo dos estados criados à superfície de um semicondutor ou na interface entre dois materiais diferentes [4].

A recombinação à superfície representa um caso particular da recombinação SRH. Contrariamente à recombinação em volume, que é caracterizada pelo tempo de vida dos portadores, neste caso o parâmetro usualmente utilizado é a velocidade de recombinação à superfície.

De forma simplificada, a taxa de recombinação de superfície é escrita na forma:

$$U_S = S_p(p - p_0) \quad (13)$$

para materiais do tipo-p, e

$$U_S = S_n(n - n_0) \quad (14)$$

para materiais do tipo-n. S_n e S_p representam as velocidades de recombinação à superfície para elétrons e buracos, respetivamente. Os seus valores não são necessariamente constantes, embora sejam na maioria dos casos tratados como tal [4].

Tal como a recombinação de SRH, este não é um processo intrínseco à célula, sendo por isso possível de reduzir. Para tal, recorre-se a um método denominado passivação, depositando um filme dieléctrico responsável por diminuir drasticamente a recombinação junto à superfície. Esta pode dividir-se em passivação química e passivação por efeito de campo. A primeira funciona por cobertura das ligações pendentes na superfície, a segunda dá-se através da introdução de cargas fixas de sinal contrário à dopagem de superfície que ao gerarem um campo elétrico atraem os portadores maioritários e repelem os minoritários. Dentro das várias técnicas existentes, tem-se por exemplo o crescimento a altas temperaturas de uma camada de dióxido de silício (SiO_2) ou deposição por plasma de um filme de nitreto de silício.

2.3.2 Tempos de vida

O tempo de vida dos portadores é um dos principais indicadores de qualidade de uma célula fotovoltaica, definindo-se como o tempo que os portadores minoritários demoram a decair no processo de recombinação. Isto resulta do facto de que quanto maior for o tempo de existência de um portador, maior será a probabilidade de ser coletado pela junção p-n e contribuir assim para a geração de corrente [13].

Tendo em conta os quatro tipos de recombinações apresentados a cima, o tempo de vida efetivo (τ_{ef}) vem:

$$\frac{1}{\tau_{ef}} = \frac{1}{\tau_{rad}} + \frac{1}{\tau_{Au}} + \frac{1}{\tau_{SRH}} + \frac{1}{\tau_s} = \frac{1}{\tau_b} + \frac{1}{\tau_s} \quad (15)$$

Em que τ_b corresponde ao tempo de vida de recombinação em volume, característico do material, e τ_s corresponde ao tempo de vida da recombinação em superfície, dependente da espessura da amostra, W , e da velocidade de recombinação de superfície, S (daqui em diante assume-se que a velocidade de recombinação é igual nas duas superfícies, i.e. $S_1=S_2=S$).

Num caso com tempos de vida constantes no volume e uma velocidade de recombinação à superfície baixa, vem

$$\frac{1}{\tau_{ef}} = \frac{1}{\tau_b} + \frac{2S}{W} \quad (16)$$

Para velocidades de recombinação muito elevadas à superfície, de uma forma simplificada vem:

$$\frac{1}{\tau_{ef}} = \frac{1}{\tau_b} + D \left(\frac{\pi}{W} \right)^2 \quad (17)$$

em que D representa a difusividade dos portadores de carga [12].

Comparando de um modo geral os três tipos de recombinação em volume, a Figura 2-9 mostra a variação dos tempos de vida em função da concentração dos portadores de carga em excesso. O gráfico apresentado refere-se a uma célula de silício do tipo-p com uma resistividade de $1 \, \Omega\text{cm}$ (resistividade típica de células solares).

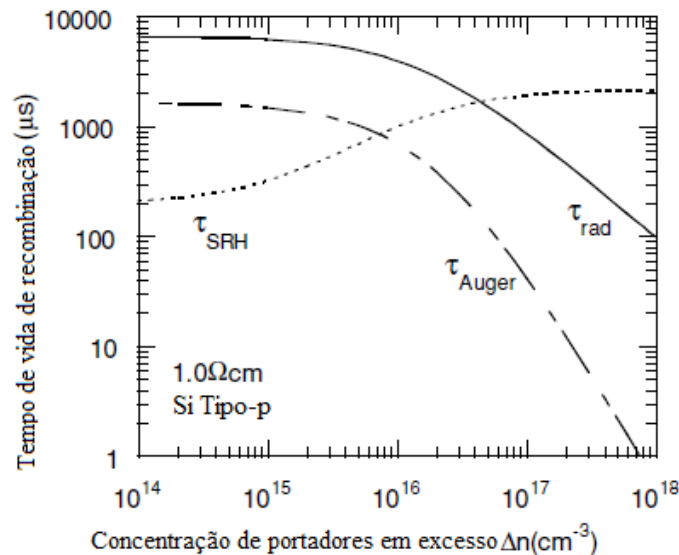


Figura 2-9: Comparação dos três tipos de recombinação em volume relativamente aos tempos de vida numa célula solar de silício do tipo-p [11].

As curvas para a recombinação radiativa e de Auger são intrínsecas ao material, no entanto, a curva apresentada para a recombinação de SRH é apenas uma das muitas representações possíveis. Neste caso, a figura mostra que a recombinação de SRH, fortemente dependente das propriedades dos defeitos do material, tende a dominar para baixas concentrações de portadores. Ainda que a recombinação radiativa possa chegar a dominar a de Auger para concentrações muito baixas, a altas concentrações a de Auger torna-se completamente dominante. De um modo geral, pode-se portanto afirmar que a recombinação radiativa é desprezável na análise dos tempos de vida de células solares de silício [11].

2.3.3 Comprimentos de difusão

O comprimento de difusão L representa a distância média percorrida pelo portador minoritário desde a sua geração até à sua recombinação.

Tal como os tempos de vida, os comprimentos de difusão estão fortemente dependentes dos processos de recombinação. Taxas de recombinação menores significam comprimentos de difusão maiores e, por isso, maiores tempos de vida, resultando em melhores materiais semicondutores.

O comprimento de difusão (L) é fortemente dependente do tempo de vida τ e pode ser calculado com recurso a:

$$L_e = \sqrt{D\tau} \quad (18)$$

Onde D representa a difusividade (em m^2/s).

2.4 Células solares

2.4.1 Estrutura típica de uma célula solar de silício cristalino

A estrutura típica de uma célula solar do tipo-p está representada na Figura 2-10.

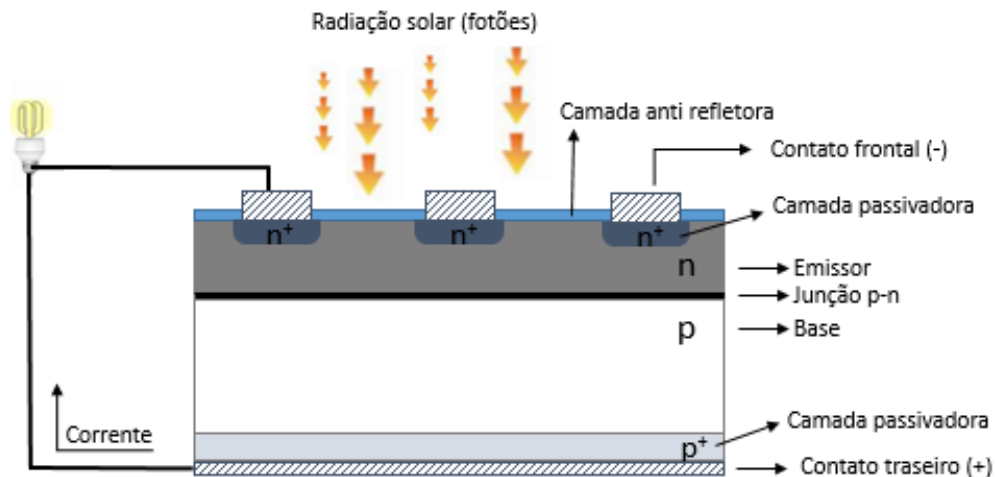


Figura 2-10: Estrutura típica de uma célula solar de silício do tipo-p.

Estas células são constituídas na base por silício do tipo-p e no emissor por silício do tipo-n, dando origem à junção p-n. Uma vez que o seu objetivo é a geração de eletricidade, colocam-se contatos frontais e traseiros nestas. O contato frontal não deve cobrir demasiado a célula, tendo como principal função o transporte eficiente dos portadores sem interferir demasiado com a coleção da radiação solar incidente. Este é composto pelas *busbars* e pelos *fingers* (ou dedos) na forma de uma rede fina. Como contacto traseiro é usual ter-se uma camada completamente metalizada. Este contato em alguns casos pode ser subdividido em duas áreas: cerca de 5% da área corresponde a suportes de contacto (usualmente de prata e encontram-se na mesma direção das *busbars*) e a restante área corresponde a uma deposição uniforme de alumínio.

Por forma a reduzir a reflexão da luz, o lado frontal da célula é texturizado e usualmente coberto por uma camada de nitreto de silício (Si_3N_4) com a dupla função de camada anti refletora e camada passivadora [14]. Uma vez que o nitreto de silício é um material isolante, as zonas onde se encontram os contatos metálicos não podem ser passivadas desta forma. Assim, de maneira a reduzir a recombinação de superfície, aumenta-se a concentração de dopante sob os contatos frontais, n^+ , e sobre o contato traseiro, p^+ .

2.4.2 Circuito equivalente

Numa célula solar fotovoltaica a corrente elétrica que circula através desta pode ser vista como a soma da fotocorrente, ou seja, a corrente gerada a partir da incidência de radiação na superfície da célula, com uma corrente de sentido oposto, correspondente à de um díodo [15].

Assim, com o objetivo de estudar o comportamento destas células, é comum representar-se o seu circuito elétrico com recurso a um dos dois modelos a seguir descritos: modelo de um díodo e modelo de dois díodos.

Modelo de um díodo

Neste modelo o circuito equivalente de uma célula solar é representado por uma fonte de corrente em paralelo com um díodo, a resistência de curto-circuito R_p e a resistência série R_s .

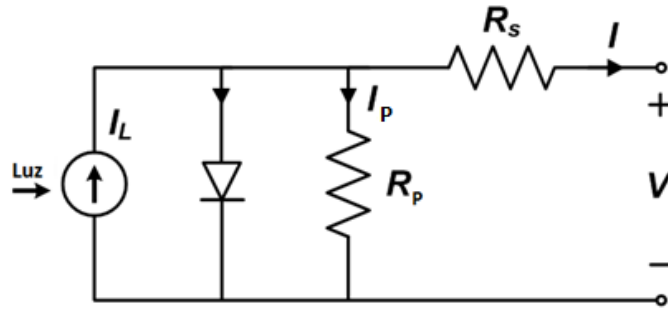


Figura 2-11: Modelo de um díodo de uma célula solar fotovoltaica

O modelo representado na Figura 2-11 relaciona a fotocorrente gerada I_L , a corrente no díodo I_D , que representa a corrente perdida nos processos de recombinação e difusão, e a corrente I_p que representa a corrente perdida devido à resistência paralela (equação 19).

$$I = I_L - I_D - I_p \quad (19)$$

A corrente I_D é descrita pela equação de um díodo ideal:

$$I_D = I_0 \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{\beta V_T}\right) - 1 \right] \quad (20)$$

Em que I_0 representa a corrente de saturação, β representa o fator de idealidade de um díodo e V_T a tensão térmica dada por:

$$V_T = \frac{k_B T}{q} \quad (21)$$

Sendo k_B a constante de Boltzmann e q a carga elementar de um elétron.

Admitindo uma corrente $I_p = (V + IR_s)/R_p$ a fluir na resistência em paralelo e associando a equação 19 à 18, obtém-se a equação da corrente numa célula solar iluminada segundo o modelo de um díodo [16]:

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{\beta V_T}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (22)$$

Modelo dos dois díodos

O modelo que mais se aproxima à corrente de uma célula fotovoltaica real é o modelo dos dois díodos. Este modelo é semelhante ao modelo de um díodo, diferindo apenas na presença de um segundo díodo em paralelo com a fonte de corrente.

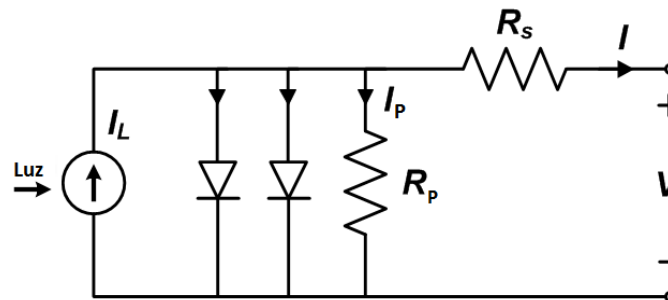


Figura 2-12: Modelo de dois díodos para uma célula solar fotovoltaica.

A corrente de uma célula solar iluminada é então dada por:

$$I = I_L - I_{01} \left[\exp \left(\frac{V + IR_S}{\beta_1 V_T} \right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp \left(\frac{V + IR_S}{\beta_2 V_T} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_P} \quad (23)$$

É também muito comum olhar-se para a equação no escuro [5]:

$$I = I_{01} \left[\exp \left(\frac{V - IR_S}{\beta_1 V_T} \right) - 1 \right] + I_{02} \left[\exp \left(\frac{V - IR_S}{\beta_2 V_T} \right) - 1 \right] + \frac{V - IR_S}{R_P} \quad (24)$$

Os termos I_{01} e I_{02} correspondem, respetivamente, à corrente de saturação da base e do emissor e à corrente de saturação originada na zona de depleção da célula. Os termos β_1 e β_2 correspondem ao fator de idealidade da célula sendo que por norma assumem um valor entre 1 e 2, embora na prática se verifique algum desvio relativamente a estes valores [9].

2.4.3 Perdas e defeitos em células solares

As perdas que se dão nas células solares têm sido alvo de muitos estudos, uma vez que ao minimizá-las se consegue um aumento da eficiência de conversão da energia solar em energia elétrica. Estas estão agrupadas em três grandes categorias: perdas espectrais, perdas óticas e perdas elétricas, tal como esquematizado a baixo.

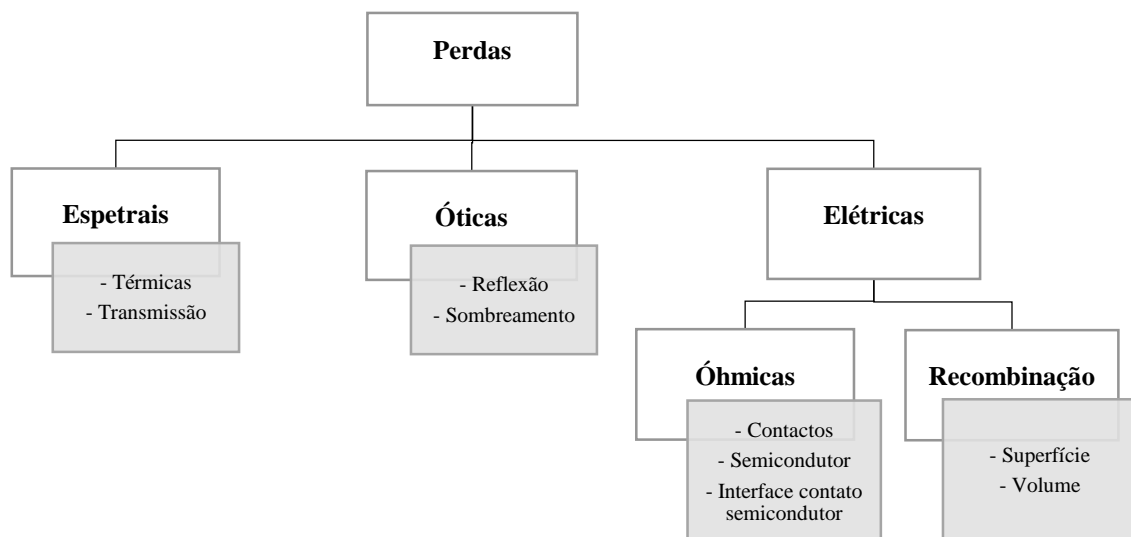


Figura 2-13: Tipos de perdas em células solares [5, 11].

As perdas óticas, responsáveis pela redução da quantidade de radiação incidente na célula, devem-se essencialmente a dois fatores: reflexão de cerca de 35 a 50% da luz incidente na superfície do silício e sombreamento na ordem de 3 a 12% devido à grelha de contactos, dependendo da geometria de contactos utilizada [5].

As perdas espectrais, intrínsecas ao semicondutor utilizado, correspondem à não absorção de comprimentos de onda elevados (fótons com energia inferior à energia do hiato) e ao não aproveitamento da energia em excesso nos comprimentos de onda baixos (mesmo com energias muito elevadas, um fóton só consegue originar um par eletrão-buraco, desperdiçando a energia superior a E_g sob a forma de calor - termalização). Este tipo de perdas, ilustradas na Figura 2-14, é

responsável por uma perda de cerca de 45% da energia presente no espectro solar, conduzindo a uma das principais limitações no crescimento da eficiência das células solares [11].

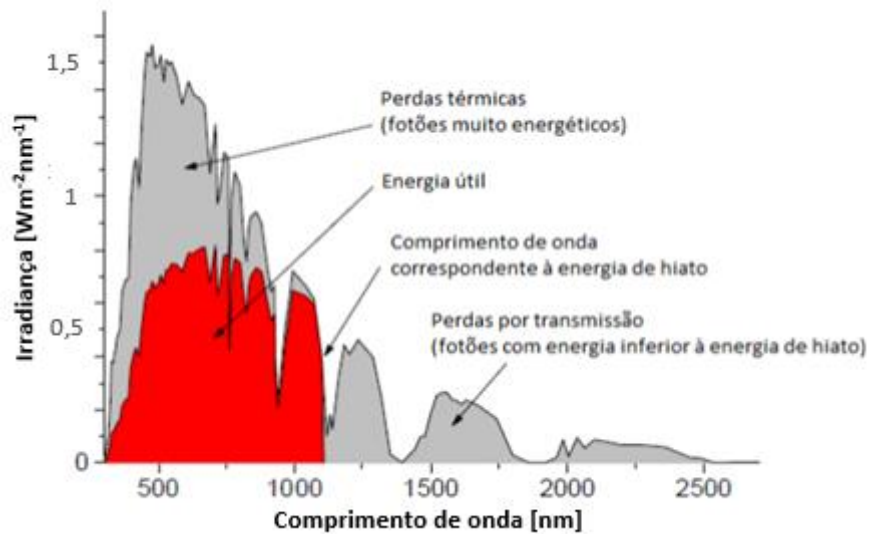


Figura 2-14: Relação entre a energia do espectro solar (AM 1.5) e a energia máxima que uma célula solar de silício consegue absorver. Adaptado de Glunz et al., 2012 [14].

Relativamente às perdas elétricas, estas têm um impacto negativo tanto na corrente como na tensão geradas. Fazem parte das perdas elétricas devido às resistências série e resistência de curto-circuito.

A resistência série, R_s , tem a sua origem nos seguintes componentes: resistências de contacto na interface entre o metal e o semiconductor (tanto no topo como na base da célula); resistências óhmicas nos contactos metálicos; resistências óhmicas no substrato semiconductor. Numa célula ideal, a resistência série é zero.

Já a resistência de curto-circuito (ou paralela), R_p , é definida pela magnitude da corrente de fuga medida nos bordos da célula. Estas fugas de corrente podem surgir devido a interrupções na junção p-n (causadas pela presença de impurezas que dificultaram o processo de difusão do emissor n) ou devido a pequenos curto-circuitos entre o contato traseiro e o contato frontal da célula. Numa célula ideal, a resistência de curto-circuito é infinita [5].

A influência das resistências óhmicas nos parâmetros das células solares será estudada mais à frente no capítulo 3.

À parte das perdas, as células solares são ainda vulneráveis a uma série de defeitos que podem surgir, tanto no fabrico das mesmas, como mais tarde com o decorrer do uso. A eletroluminescência (EL) e a termografia, abordadas nesta dissertação, são duas técnicas utilizadas para a deteção de defeitos em células.

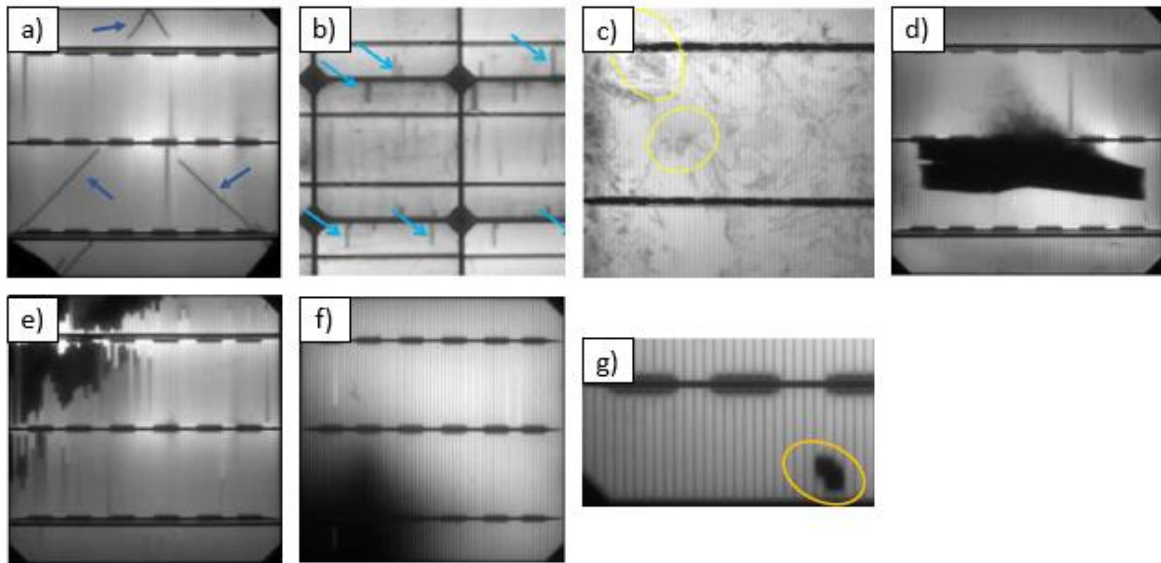


Figura 2-15: Exemplo de imagens de EL com possíveis defeitos em células solares: a) fissuras, b) rutura nos contatos frontais, c) heterogeneidade dos cristais de silício, d) defeito na metalização traseira, e) defeito na metalização frontal, f) Curto-circuito na *busbar*, g) Curto-circuito local [17, 18].

Os defeitos mais comuns de identificar são:

- Fissuras (*cracks*) e microfissuras:

Nos últimos anos, tem-se observado por um lado a diminuição da espessura das células, de cerca de 300 μm para menos de 200 μm , com o objetivo de diminuir a quantidade de silício gasto, e por outro o aumento da sua área [17], tornando-as conseqüentemente mais frágeis e mais suscetíveis a fraturas. As fissuras e as microfissuras do material semiconductor são, no caso das células solares de silício cristalino, responsáveis pela maioria dos casos de perdas de corrente [18]. As microfissuras correspondem a pequenas fissuras que não são possíveis de detetar a olho nu. No entanto, ambos os casos são responsáveis pela criação de zonas de recombinação dos portadores. A Figura 2-15a mostra o aspeto típico de fissuras e micro fissuras em células de silício.

- Interrupções nos contatos frontais:

Durante o processo de fabrico ou montagem das células, os dedos da rede de contatos frontal das mesmas podem sofrer ruturas. O impacto desta rutura varia com a posição e a profundidade da interrupção. No caso de ruturas mais próximas dos bordos da célula o impacto será superior, uma vez que não haverá ligação a uma *busbar* por nenhum outro lado [18]. Este defeito é facilmente detetável em imagens de EL, aparecendo como zonas mais escuras em torno do contacto com rutura. Exemplos deste defeito são apresentados na Figura 2-15b.

- Heterogeneidade dos cristais

A heterogeneidade dos cristais de silício pode estar relacionada, por exemplo, com a qualidade do material, com flutuações na concentração de dopante ou na espessura do material ou com defeitos estruturais. Esta heterogeneidade leva a conseqüentes diferenças entre os vários hiatos de energia, provocando uma diminuição na eficiência da célula [18]. Este tipo de defeito é visível nas imagens de EL como uma zona mais escura, sendo um exemplo disso a Figura 2-15c.

- Defeitos na metalização frontal e traseira

Defeitos na metalização traseira e frontal aparecem também eles como zonas mais escuras nas imagens de EL, exemplificado na Figura 2-15d-e. Geralmente, apenas cerca de metade dos defeitos relacionados com a metalização traseira conseguem ser detetados visualmente, aparecendo como

zonas mais claras no alumínio, enquanto os defeitos relacionados com a metalização frontal são visíveis a olho nu [19].

- Curto-circuitos (*shunts*) e *hotspots*:

Curto-circuitos correspondem a zonas muito localizadas de correntes de fuga entre o contato superior e inferior da célula (Figura 2-15f-g). Estes podem surgir, por exemplo, devido a falhas no processo de deposição do emissor, resultando numa camada muito fina, devido à presença de impurezas como pó e metais ou ainda devido a defeitos cristalográficos. Uma vez que nestes pontos a resistência é muito baixa, obtém-se igualmente um baixo fator de forma (FF) e consequente baixo valor de V_{OC} (parâmetros abordados mais adiante, no capítulo 3) [18].

O surgimento de *hotspots* é uma das consequências dos curto-circuitos. Estes são zonas onde a temperatura é muito elevada, podendo causar sérios danos nas células. Estes defeitos podem ser detetados com recurso à termografia.

- Contaminações por PID podem resultar num caso particular das *shunts*:

Com o desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica têm surgido parques solares cada vez maiores, com consequente aumento do número de módulos fotovoltaicos ligados em série. As elevadas tensões a que os sistemas se encontram expostos levam ao chamado *potential induced degradation* PID (degradação induzida por potencial) que resulta em perdas na potência gerada pelo módulo, devido à criação de curto-circuitos [20].

Na Europa, a tensão máxima permitida num parque fotovoltaico corresponde aos 1000 V, no entanto, a degradação por PID pode ocorrer a tensões mais baixas (~600 V). O PID é acelerado, principalmente, pelo aumento da humidade e da temperatura.

Estudos feitos até agora demonstraram que a degradação PID envolve três componentes dos painéis: vidro sódico-cálcico, camada de encapsulamento EVA (*ethylene-vinyl acetate*) e camada anti refletora existente nas células solares. No entanto, embora este possa ser provocado por diversos iões, nas instalações já existentes, o sódio presente no vidro que cobre os painéis é apontado como o principal responsável pela degradação [21].

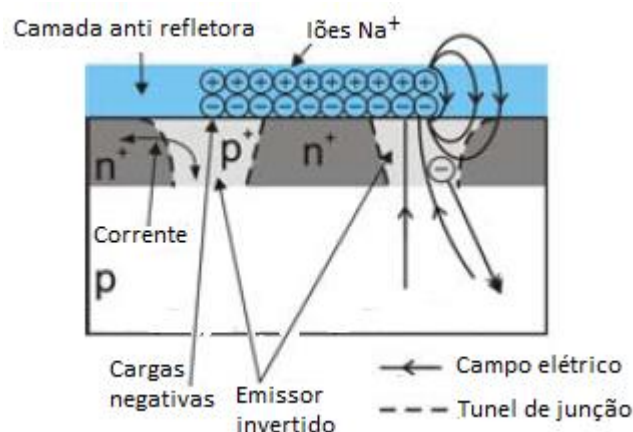


Figura 2-16: Esquema proposto do impacto do PID numa célula solar. Formação de uma dupla camada de cargas e consequente curto-circuito da junção p-n. Adaptado de Bauer et al., 2012 [21].

Numa célula do tipo-p as cargas no emissor são negativas, enquanto os iões de sódio presentes no vidro (ligado à terra) têm um potencial positivo relativamente à célula. Devido à elevada diferença de potencial entre a célula e o vidro é gerado um campo elétrico responsável por atrair os iões de sódio desde o vidro, através do encapsulamento, até à camada anti refletora da célula. O modelo esquematizado na Figura 2-16 sugere que estas cargas positivas que se vão juntando são responsáveis por atrair e criar uma outra camada de cargas negativas (de natureza ainda incerta) na camada anti

refletora, entre o emissor n^+ e a camada positiva formada. O campo elétrico provocado pela criação desta dupla camada de carga é responsável por repelir os elétrons do emissor. Se o campo elétrico for suficientemente elevado, tal pode levar a zonas de rutura da junção $p-n$, deixando de existir emissor e ocorrendo correntes de fuga elevadas que se traduzem em consequentes baixas na resistência paralela da célula. Nestas zonas verifica-se a inversão do emissor de n^+ para p^+ , observando-se primeiro nos contornos da dupla camada formada, onde o campo elétrico é mais intenso [21, 22].

Já foi demonstrado que a prevenção do PID pode ser feita através da utilização de materiais alternativos nos módulos fotovoltaicos, embora estes possam trazer outros inconvenientes. Exemplos disso é a substituição do vidro sódico-cálcico por um vidro de quartzo ou a utilização de um encapsulamento termoplástico de resistência elevada em vez do EVA [23].

No decorrer desta dissertação foi iniciado um estudo sobre este tipo de contaminação de células. A estrutura do sistema montado e os resultados obtidos encontram-se no anexo A.1.

3 Caracterização das células solares

A caracterização de dispositivos fotovoltaicos é fundamental para o controlo e evolução da tecnologia. Neste capítulo serão abordadas as técnicas utilizadas nesta dissertação na caracterização de células solares. A primeira consiste na análise da curva corrente-tensão (curva I-V) e na determinação dos parâmetros da célula em condições de iluminação, no escuro e com recurso ao Suns-Voc; a segunda consiste na determinação da curva de resposta espectral; a terceira e quarta correspondem a técnicas usualmente utilizadas na deteção de defeitos: termografia e eletroluminescência. Serão ainda abordados os equipamentos utilizados em cada técnica e descrito o sistema experimental desenvolvido para a técnica de caracterização por eletroluminescência e termografia.

3.1 Curvas I-V

As curvas I-V são obtidas tanto com iluminação de um sol como no escuro, estudando a corrente gerada aquando da aplicação de uma tensão. O comportamento típico destas curvas está representado na figura a baixo.

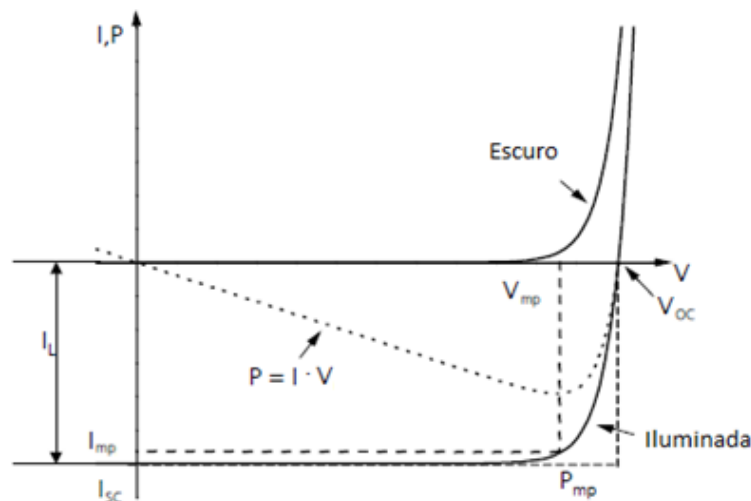


Figura 3-1: Comportamento típico da curva I-V iluminada e no escuro, para uma célula do tipo-p.

A curva I-V iluminada corresponde aproximadamente à soma da curva I-V no escuro com a fotocorrente I_L . Graficamente a curva iluminada é transportada para o quarto quadrante devido à ação da luz, no entanto, para efeitos práticos, esta curva é invertida para o primeiro quadrante, de onde se retiram os parâmetros da célula solar.

3.1.1 Curva I-V iluminada

Através da curva I-V iluminada é possível determinar os parâmetros fundamentais da célula solar, nomeadamente a corrente de curto-circuito, I_{SC} , a tensão em circuito aberto, V_{OC} , a potência máxima, P_{mp} , o fator de forma, FF , e o rendimento, η .

A corrente de curto-circuito, I_{SC} , define-se como a corrente máxima obtida quando a tensão aplicada aos terminais da célula solar é nula, sendo idealmente igual à fotocorrente I_L . Uma vez que esta depende da área da célula solar, é comum recorrer-se à densidade de corrente de curto-circuito J_{SC} . Valores elevados são indicadores de tempos de vida e comprimentos de difusão elevados e ainda

de velocidades de recombinação baixas, assumindo em células solares de silício (sob a iluminação de um espectro AM1.5) o valor máximo de 45,56 mA/cm². No entanto, este valor só é alcançável numa situação ideal sem qualquer recombinação na célula, sem sombreamento e sem perdas por reflexão na superfície frontal [12].

A tensão de circuito-aberto define-se como a tensão máxima obtida em condições de circuito aberto, ou seja, quando a corrente que atravessa a célula é nula, sendo descrita pela expressão

$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \ln \left(1 + \frac{I_L}{I_0} \right) \quad (25)$$

Mesmo na presença de densidades de corrente muito baixas $I_L/I_0 \gg 1$ e $I_L \approx I_{SC}$, obtendo-se [9]:

$$V_{OC} \sim \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{SC}}{I_0} \right) \quad (26)$$

O V_{OC} depende essencialmente da corrente de saturação I_0 .

A potência da célula obtém-se fazendo o produto de I por V , sendo que a potência máxima, P_{mp} , corresponde ao produto $I_{mp}V_{mp}$. O valor de I_{mp} e V_{mp} corresponde, respetivamente, à corrente e tensão no ponto de potência máxima. Deste modo, o factor de forma, FF , expressa-se por:

$$FF = \frac{P_{mp}}{P_{ideal}} = \frac{I_{mp}V_{mp}}{I_{SC}V_{OC}} \quad (27)$$

Este parâmetro diz respeito à qualidade da célula, sendo tanto maior quanto maior a eficiência da mesma. O fator de forma usualmente encontra-se na gama de 0,7-0,85.

A eficiência da célula solar surge então como o quociente entre o ponto de potência máxima (potência de saída), P_{mp} , e a potência da iluminação incidente, P_m :

$$\eta = \frac{P_{mp}}{P_{in}} = \frac{V_{OC}I_{SC}FF}{GA_{célula}} \quad (28)$$

A eficiência máxima obtida até agora para células solares de silício monocristalino é de 25,0% enquanto que em silício multicristalino a eficiência fica pelos 21,3% [24].

Relativamente às resistências presentes numa célula solar, tal como explicado na secção 2.4.3 desta dissertação, estas dividem-se em resistências parasitas e resistência característica. O impacto das resistências parasitas está ilustrado da Figura 3-2.

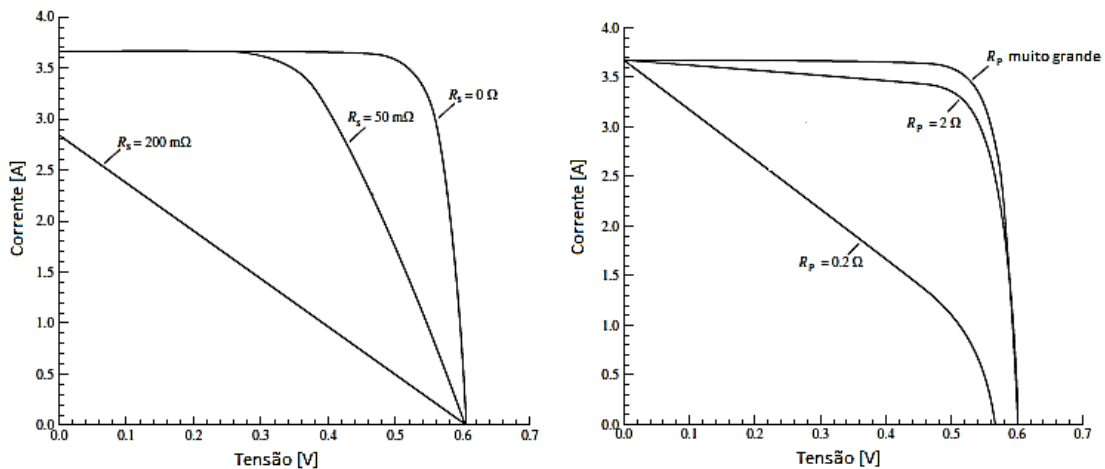


Figura 3-2: Impacto da resistência série (à esquerda) e da resistência de curto-circuito (à direita) na curva I-V iluminada de uma célula solar [4].

A resistência série obtém-se calculando o inverso do declive da curva junto ao V_{OC} enquanto a resistência de curto-circuito se obtém calculando o inverso do declive junto ao I_{SC} .

A resistência característica, R_{ch} , corresponde à resistência de saída de uma célula a trabalhar no ponto de potência máxima, sendo calculada pela seguinte expressão:

$$R_{ch} = \frac{V_{mp}}{I_{mp}} \quad (29)$$

Em laboratório, o equipamento utilizado na aquisição da curva I-V iluminada encontra-se esquematizado na Figura 3-3.

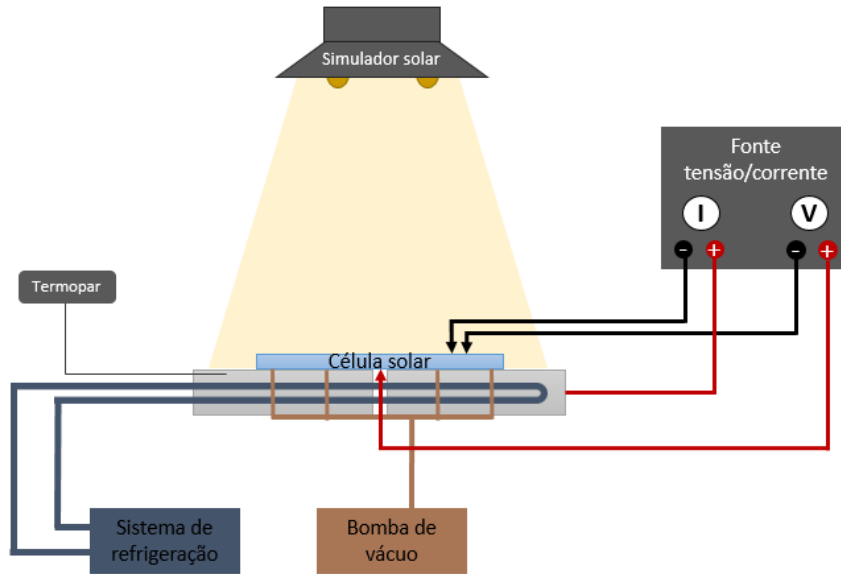


Figura 3-3: Sistema de aquisição de curvas I-V iluminadas.

O sistema é constituído por um simulador solar com um espectro aproximado ao AM1.5. A potência da iluminação utilizada nas medidas foi de 1 kW/m^2 . A característica I-V é traçada por um sistema de quatro pontos, tal como esquematizado na figura, e a célula é assente numa base refrigerada por um sistema de circulação de água e dotada de um sistema de sucção. O sistema presente no laboratório permite medir células com um máximo de $51 \times 51 \text{ mm}^2$ de área.

3.1.2 Curva I-V no escuro

A curva I-V no escuro permite estudar se a célula solar segue o comportamento típico de um díodo e, caso siga, calcular a corrente de saturação I_0 . Tal como referido anteriormente, este parâmetro é um indicador da recombinação na célula, sendo tanto maior quanto maior o valor de I_0 . Na ausência de iluminação, os pares elétron-buraco são gerados apenas devido à presença de uma tensão aplicada e devido ao efeito da temperatura. A corrente gerada é, então, igual à corrente que circula num díodo, sendo conseguida devido à presença de portadores minoritários que se deslocam do lado n para o lado p . De uma forma geral, a corrente I_0 corresponde à corrente que percorre a célula em sentido oposto à fotocorrente.

De forma simplificada, a corrente que percorre a célula no escuro é descrita pela expressão:

$$I = I_0 \left(\exp \left[\frac{qV}{kT} \right] - 1 \right) \quad (30)$$

A corrente de saturação pode ser determinada representando o gráfico $\ln(I)$ em função da tensão V . Uma vez que na vizinhança de $V = 0$ se verifica $\ln(I) \approx \ln(I_0)$, fazendo uma regressão linear nesta região do gráfico obtém-se uma reta na qual a ordenada na origem é $\ln(I_0)$ [9].

Numa célula real, como visto na secção 2.4.2 desta dissertação, a corrente que percorre a célula no escuro é descrita pela equação (24). A Figura 3-4 apresenta a curva I-V no escuro em escala logarítmica, obtida através desta equação, de onde se podem obter os parâmetros I_{01} , I_{02} , R_S e R_P da célula solar.

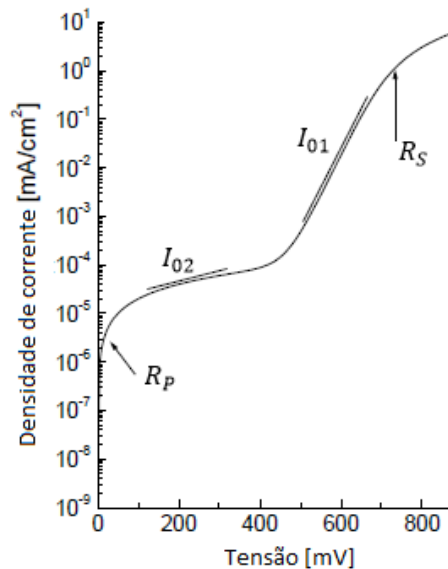


Figura 3-4: Curva I-V característica de uma célula solar no escuro [12].

3.1.3 Suns-Voc

A curva obtida nas medidas com o Suns-Voc fornece informação sobre o desempenho da célula sem o impacto da resistência série, uma vez que é medida em circuito aberto, logo sem a presença de corrente a percorrer a célula.

O método de medida consiste na emissão de um *flash*, produzido por uma lâmpada de decaimento lento (14 ms), que permite determinar a tensão de circuito aberto, V_{OC} , em função da intensidade de luz. Este *flash* varia tipicamente entre alguns sol até menos de 0,1 sol e é monitorizado por uma célula auxiliar. Uma vez que se trata de uma medida elétrica direta, feita com recurso a um contato elétrico, o valor de V_{OC} medido à intensidade de 1 sol deve corresponder ao valor obtido na medida da curva I-V com o simulador solar (assumindo uma temperatura constante na célula e lâmpadas com espectros semelhantes).

As medidas de Suns-Voc seguem a curva de um diodo sem o efeito da resistência série, sendo portanto possível caracterizar o efeito da resistência paralela. Quando comparada com a curva I-V obtida com o simulador solar, é ainda possível ter uma ideia do impacto da resistência série na célula [25, 26].



Figura 3-5: Equipamento utilizado nas medidas de Suns-Voc [27].

O equipamento utilizado no laboratório é ilustrado na Figura 3-5. Este equipamento tem uma lâmpada xénon com uma calibração no intervalo 0,006-6 sol [27].

3.2 Resposta espectral e rendimento quântico

A quantidade de portadores de carga gerados numa célula solar não se relaciona de forma linear com o comprimento de onda da luz incidente. A resposta espectral $SR(\lambda)$ define-se como a razão entre a fotocorrente gerada, I_L , e a potência da radiação incidente, P_{in} , no comprimento de onda λ .

$$SR(\lambda) = \frac{I_L}{P_{in}} \quad (31)$$

Na Figura 3-6 apresenta-se o sistema utilizado para medir a resposta espectral.

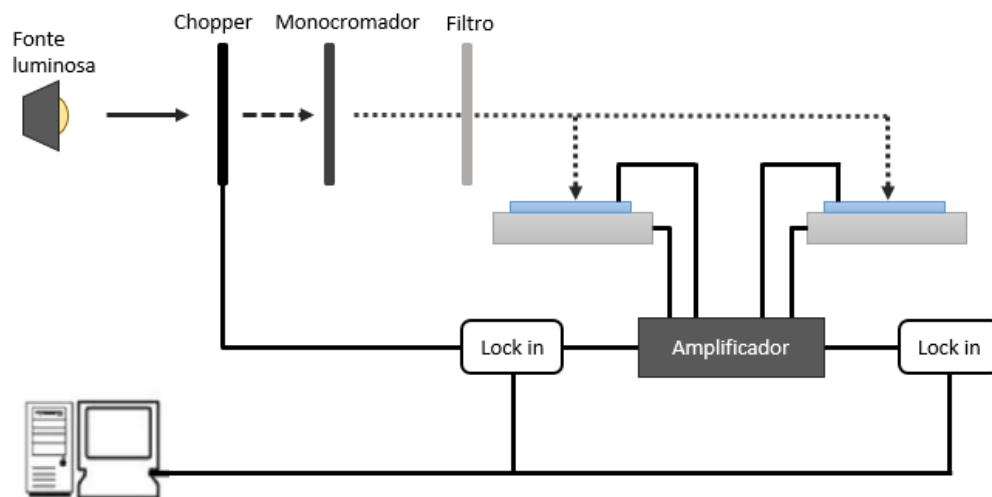


Figura 3-6: Sistema experimental de resposta espectral.

O sistema é constituído por uma lâmpada de halogéneo com uma intensidade constante ao longo da experiência. Numa primeira fase, o comprimento de onda da radiação é selecionado por um monocromador e o sinal é cortado em intervalos regulares por um *chopper* (talhador), de forma a obter-se uma radiação incidente com comprimento de onda e frequência conhecida. De seguida, o feixe obtido é conduzido por uma fibra ótica que se divide no seu interior em dois feixes, sendo um deles incidente na célula de referência e o outro na amostra a caracterizar. Por fim, a fotocorrente gerada tanto na célula de referência como na amostra são transmitidas a dois amplificadores lock-in que sincronizam e transmitem as medidas ao computador.

As medidas efetuadas foram realizadas no intervalo de 400 a 1150 nm. Para comprimentos de onda iguais ou superiores a 800 nm foi introduzido um filtro com o objetivo de eliminar a radiação que corresponde às harmônicas de luz de comprimento de onda inferiores.

O sistema de aquisição de dados funciona de forma automática, desenhando a curva de resposta espectral segundo a expressão:

$$SR(\lambda) = SR_{ref}(\lambda) \frac{a(\lambda)}{a_{ref}(\lambda)} \quad (32)$$

Sendo $SR_{ref}(\lambda)$ a resposta espectral na célula de referência, $a(\lambda)$ a amplitude do sinal medida na amostra a caracterizar e $a_{ref}(\lambda)$ na amostra de referência. $SR_{ref}(\lambda)$ e $a_{ref}(\lambda)$ são dados conhecidos.

3.2.1 Eficiência quântica externa

A eficiência quântica externa, EQE , corresponde ao número de portadores coletados nos contatos da célula por cada fóton incidente. Esta relação está presente na expressão [9]

$$EQE = \frac{I_L}{q} \frac{q}{P_{in}} \frac{1}{h\nu} \quad (33)$$

sendo $\nu = c/\lambda$.

A Figura 3-7 mostra a curva típica de EQE para uma célula ideal e para uma célula real. No caso ideal, todos os fótons incidentes, com energia igual ou superior à energia de hiato E_g , geram portadores que são conduzidos aos contatos da célula e, por isso, assume o valor de $EQE=1$ para comprimentos de onda inferiores a hc/E_g . Em células reais, este comportamento não se verifica, sendo possível de detetar vários problemas na célula por observação gráfica. Eficiências quânticas reduzidas para comprimentos de onda baixos e altos remetem para a existência de recombinação na superfície frontal e traseira da célula, respetivamente. A deslocação observada para comprimentos de onda intermédios remete para uma redução global da EQE devido a perdas óticas e baixos comprimentos de difusão dos portadores.

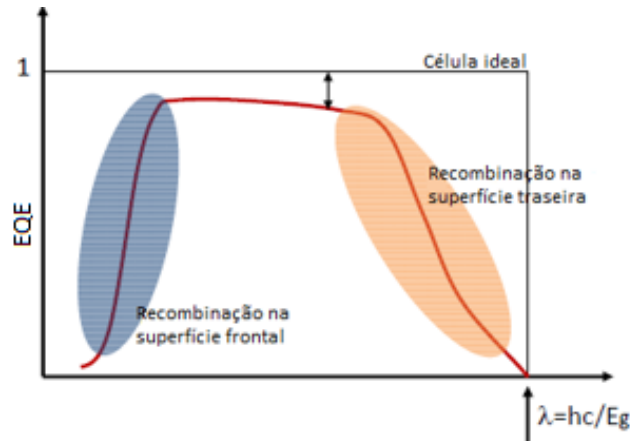


Figura 3-7: Curva típica de EQE . Adaptado de Serra, 2014 [28].

Tendo em conta as equações (31) e (33), a eficiência quântica externa relaciona-se com a resposta espectral através da expressão:

$$SR(\lambda) = \frac{EQE \times q}{h\nu} = \frac{RQE \times \lambda}{1,24} \quad (34)$$

em que a unidade de λ é μm .

Numa célula ideal, a resposta espectral aumenta de forma linear com o comprimento de onda, no entanto, em células reais esta atinge um pico máximo por volta dos 800 nm, decaindo a partir deste ponto. Este declínio da resposta espectral, permite determinar o comprimento de difusão dos portadores de carga minoritários, L_e . Com este objetivo, torna-se necessário determinar a eficiência quântica interna e refletância antes de determinar o comprimento de difusão.

3.2.2 Eficiência quântica interna

A eficiência quântica interna corresponde ao número de portadores coletados nos contatos da célula em função do número de fótons absorvidos por esta, obtém-se da expressão [9]

$$EQI = \frac{EQE}{1 - R - T} \quad (35)$$

sendo T a transmitância. No caso das células em estudo nesta dissertação a espessura é suficiente para se assumir uma transmitância nula, sendo utilizada para o cálculo da EQI a expressão:

$$EQI = \frac{EQE}{1 - R} \quad (36)$$

3.2.3 Refletância

A refletância, R , das amostras é conseguida segundo a expressão [9]

$$R = \frac{R^{med}}{R_{ref}^{med}} R_{ref} \quad (37)$$

sendo R^{med} a refletância medida nas amostras a caracterizar, R_{ref}^{med} a refletância medida na amostra de referencia e R_{ref} o valor tabelado da refletância da amostra de referência (anexo A.2).

A refletância foi medida, utilizando um espectrofotômetro, no intervalo dos 400 aos 1200 nm com recurso a um espelho de alumínio como amostra de referência.

3.2.4 Comprimento difusão dos portadores minoritários

Conhecendo a eficiência quântica interna, é possível determinar o comprimento de difusão dos portadores minoritários L_e (elétrões, em células do tipo-p). Este parâmetro corresponde à distância percorrida pelos elétrões até estes se recombinarem com um buraco, influenciando fortemente a qualidade da célula. Células de boa qualidade apresentam comprimentos de difusão elevados, ou seja, quando $L_e > 3d$, em que d corresponde à espessura da parte ativa da célula.

Para determinar L_e com recurso à eficiência quântica interna é necessário conhecer o coeficiente de absorção α . Para comprimentos de onda no intervalo dos 800 aos 1000 nm a seguinte expressão permite calcular α , em função do comprimento de onda, em células de silício [9]:

$$\alpha(\lambda) = \left(\frac{85,9}{\lambda} - 77,9 \right)^2 \quad (38)$$

O comprimento de difusão pode, então, ser determinado recorrendo ao gráfico de E_{QI} em função do inverso do coeficiente de absorção. Na região em que $1/\alpha \ll t$ (sendo t a espessura da amostra) verifica-se que

$$RQI^{-1} = 1 + \frac{1}{\alpha L_{eff}} \quad (39)$$

Quando na presença de células em que $L_{eff} \ll t$ assume-se $L_{eff} \approx L_e$ obtendo-se

$$RQI^{-1} = 1 + \frac{1}{\alpha L_e} \quad (40)$$

Resumidamente, o valor do comprimento de difusão corresponde ao declive da reta obtida do gráfico de RQI^{-1} em função de α^{-1} no intervalo de 800 a 1000 nm.

3.3 Eletroluminescência

Contrariamente às imagens termográficas, que têm a sua origem num efeito térmico, o fenómeno de luminescência ocorre quando se dá a emissão de radiação (a temperaturas relativamente baixas) devido à emissão de fótons nos processos de recombinação. Por este motivo, a luminescência pode também ser chamada de luz fria [17].

Para que este fenómeno se dê, é necessário expor um determinado material a uma certa quantidade de energia, excitando os eletrões nele presentes para níveis de energia superior. O seu regresso ao estado fundamental leva à emissão da energia absorvida provocando o efeito de luminescência.

A eletroluminescência, EL, é uma forma específica de luminescência. No caso desta dissertação, tendo sido utilizadas células de silício cristalino, as imagens de eletroluminescência resultam da deteção dos fótons emitidos no processo de recombinação radiativa assistida por fótons (passagem de eletrões de banda-a-banda) quando é injetada uma determinada corrente aos terminais da célula. De uma forma simplificada, a eletroluminescência corresponde ao processo inverso do funcionamento típico da célula solar: ao invés de converter radiação visível em energia elétrica, emite radiação quando é percorrida por uma corrente elétrica [29].

Esta técnica de caracterização tem-se vindo a mostrar bastante útil não só para o estudo das células solares, mas também na identificação de defeitos e contaminações que possam surgir nestas células. Quando polarizada de forma direta, a radiação emitida por uma célula solar de silício encontra-se na região do infravermelho (aproximadamente entre 1000 e 1200 nm) do espectro eletromagnético, não sendo por isso detetável a olho nu. Com o objetivo de detetar o espectro de emissão da célula é comum utilizar-se um fotodetector com um sensor de silício (Si-CCD) ou um sensor de arsenieto de gálio-índio (InGaAs).

Na Figura 3-8, a linha a tracejado, representa o espectro de emissão típico de uma célula de silício à temperatura ambiente, quando polarizada de forma direta. Esta curva apresenta um pico de luminescência nos 1150 nm, correspondente ao comprimento de onda do hiato de energia do silício. A linha a pontilhado representa a curva típica de sensibilidade de um fotodetector Si-CCD, cujo alcance máximo é 1200 nm. A linha sólida representa a porção limitada de luminescência captada por um fotodetector de silício, que tem um pico nos 1050 nm [30].

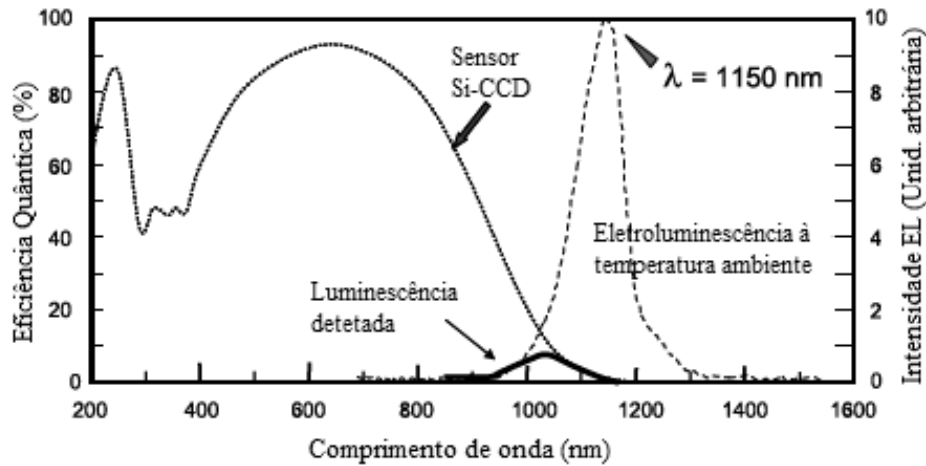


Figura 3-8: Espectro de emissão típico de uma célula solar e sensibilidade de uma câmara Si-CCD [30].

Fotodetetores com sensores de InGaAs são sensíveis a comprimentos de onda superiores a 1000 nm, no entanto, câmaras com sensores de silício fornecem imagens com melhor resolução e tem custos consideravelmente inferiores às de InGaAs [31]. Por isso, nesta dissertação utilizaram-se câmaras com sensores de silício.

A intensidade dos fótons emitidos depende do material, das propriedades óticas e dos mecanismos de recombinação da célula solar, contudo, existe uma forte dependência da luminescência na tensão aplicada. Esta dependência da emissão de luminescência local, $\phi(x)$, é descrita por [32]:

$$\phi(x) = C(x) \exp\left(\frac{V(x)}{V_T}\right) \quad (41)$$

onde $V(x)$ corresponde à tensão num determinado ponto x e $C(x)$ ao fator de calibração que se relaciona com as propriedades óticas da célula solar e da câmara. Esta expressão aplica-se na condição de $V(x) \gg V_T$.

A distribuição da intensidade de EL permite efetuar o mapeamento dos comprimentos de difusão dos portadores minoritários na amostra, uma vez que a intensidade da EL é proporcional à densidade total de portadores minoritários em excesso. Desta forma, os defeitos descritos na secção 2.4.3 desta dissertação, como heterogeneidades e fissuras, podem ser identificados visualmente como zonas mais escuras nas imagens de EL devido à redução da densidade de portadores minoritários. Células solares monocristalinas com uma distribuição uniforme de comprimentos de difusão resultarão em imagens de EL uniformes, enquanto as fronteiras de grão presentes nas células multicristalinas serão facilmente identificáveis nestas células.

Estas imagens são obtidas em tons de cinza, dificultando a distinção entre os vários tipos de defeitos. No entanto, defeitos intrínsecos (como fronteiras de grão) são mais sensíveis às variações de temperatura do que defeitos extrínsecos (como fissuras, contaminações ou dedos partidos), podendo ser distinguidos desta forma. No caso do silício multicristalino, imagens EL a altas temperaturas ($\sim 100^\circ\text{C}$) apresentam um menor contraste nos defeitos intrínsecos (em relação a zonas sem defeito), enquanto os defeitos extrínsecos não mostram diferenças significativas quando comparados com as imagens de EL a temperatura ambiente [30].

Num módulo, quando uma célula solar se encontra sombreada, esta apresenta-se em polarização inversa. Tal pode conduzir à rutura do díodo (rutura da junção p-n) e eventualmente danificar o módulo por degradação térmica. Teoricamente, células solares com uma concentração de dopante na

base da ordem de 10^{16} cm^{-3} apresentam, em polarização inversa, uma tensão de rutura¹ acima dos -50 V, no entanto, em células reais de silício multicristalino a tensão de rutura é de alguns volts [33]. Esta tensão de rutura constitui, em células de silício multicristalino, um problema relevante, limitando o número de células ligadas numa *string* de um módulo [34].

O fenómeno de rutura e pré-ruptura pode ser observado com recurso a imagens de eletroluminescência em condição de polarização inversa, ReBEL (*Reverse Bias EL*). Existem três tipos de tensão de rutura que surgem consoante a gama de tensões aplicadas [35]:

- Tipo I: entre os -4 e -9 V, surge pré-ruptura devido a contaminações de alumínio na superfície;
- Tipo II: entre os -9 e -13 V, a rutura é induzida predominantemente por defeitos. Deve-se essencialmente à presença de precipitados contendo metais que se encontram nas fronteiras de grão do silício multicristalino, constituindo centros de recombinação.
- Tipo III: abaixo dos -13 V, surge um elevado número de rupturas atribuídas ao aumento de zonas de curto-circuito. Caracterizam-se pelo forte impacto na curva I-V e pelo aumento das correntes de fuga devido ao impacto da polarização da junção p-n.

A corrente que percorre estas zonas de rutura da junção p-n resultam na formação de microplasmas que, geralmente, são acompanhados pela emissão de luz. Deste modo, nas imagens ReBEL, as zonas de defeito correspondem às regiões do material com mais luz emitida. Segundo a bibliografia, defeitos do tipo I detêm um espectro de emissão na região 400-800 nm, com o pico nos 715 nm, defeitos do tipo II apresentam um espectro na gama 450-1000 nm, com o pico na região 700-720 nm, e os defeitos do tipo III emitem apenas na região do infravermelho, estendendo-se até aos 1700 nm [36, 37].

3.3.1 Sistema experimental desenvolvido

A necessidade do desenvolvimento de um novo sistema de aquisição de imagens de eletroluminescência surgiu das limitações presentes no sistema já existente no laboratório. Uma vez que as células em estudo seriam células solares industriais com dimensões de $156 \times 156 \text{ mm}^2$ tornou-se necessária a existência de uma estrutura capaz de receber células desta dimensão, tendo-se para tal desenvolvido um sistema de raiz capaz de adquirir imagens de eletroluminescência de células tanto de grandes como de pequenas dimensões.

O desenho da estrutura montada pode ser analisada na Figura 3-9.

¹ A tensão de rutura de um díodo corresponde à tensão mínima necessária em polarização inversa para tornar o díodo condutor nesta polarização.

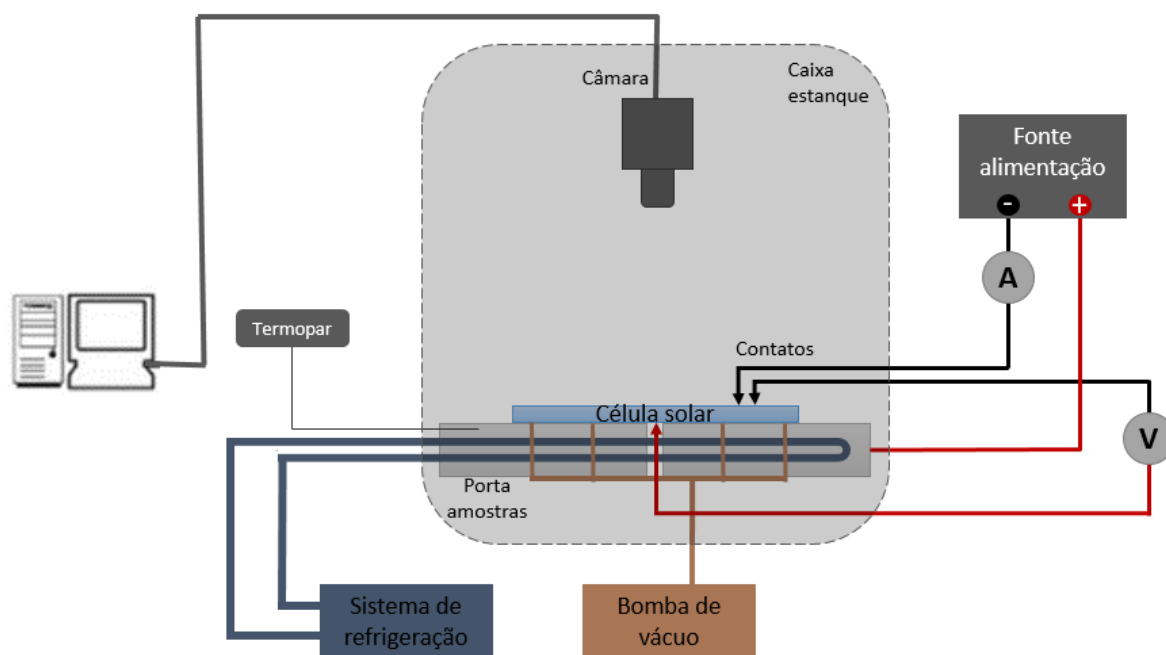


Figura 3-9: Esquema do sistema de EL desenvolvido.

Fonte de alimentação

A excitação das amostras é feita através de uma fonte de alimentação, sendo a corrente e tensão medidas na célula controladas por dois multímetros: um ligado em série na posição de amperímetro e outro ligado em paralelo na posição de voltímetro.

A fonte utilizada é a *HQ Power PS 3003* limitada ao intervalo 0-30 V / 0-3 A.

Porta-amostras

As amostras a medir são ligadas a um sistema de quatro pontos, tal como esquematizado na Figura 3-9. Uma vez que a face traseira das células é totalmente coberta pelo contacto metálico, o projeto inicial previa utilizar o próprio porta-amostras como contacto traseiro, estando diretamente ligado à fonte de alimentação. O circuito é fechado com recurso a uma ponta de prova que contacta uma das *busbars* na face frontal da amostra. Adicionalmente, a tensão é medida entre dois pontos da célula, sendo o contacto traseiro efetuado por uma agulha que atravessa, de forma isolada, o centro do porta-amostras em direção à célula, e o contacto frontal efetuado com recurso a uma outra ponta de prova. Sendo necessário utilizar um material condutor no porta-amostras, utilizou-se uma placa de alumínio com uma área superficial de 160x160 mm² e uma espessura de 24 mm.

Com o objetivo de melhorar o contacto entre a superfície do porta-amostras e a célula, a placa de alumínio foi perfurada ao longo da sua espessura em 42 pontos distribuídos pela superfície. Estes encontram-se ligados entre si a uma saída que leva a uma bomba de vácuo responsável por produzir um efeito de sucção na célula, fixando-a assim ao porta-amostras.

Por fim, a placa foi dotada de um sistema de refrigeração com o objetivo de manter a temperatura da amostra constante ao longo das medidas. Para tal, a placa foi perfurada ao longo do seu comprimento de forma a adquirir um sistema em serpentina, ligado a um *chiller*. A temperatura é monitorizada por um termopar ligado à placa de alumínio.

No decorrer da dissertação e já depois de todo o sistema se encontrar funcional, verificou-se que a agulha responsável por medir a tensão na célula constituía um problema, uma vez que se notou ser

a responsável pelo surgimento de algumas microfissuras ou mesmo fissuras nas amostras quando se ligava o sistema de vácuo. Posto isto, tornou-se necessário repensar o sistema de contactos traseiros do porta-amostras de forma a não danificar as células durante a sua caracterização. A solução encontrada consistiu na utilização de uma folha de cobre colada na superfície da placa de alumínio. Esta foi previamente recortada em forma de pente desencontrado constituindo dois sistemas de contactos isolados eletricamente: um ligado à fonte de alimentação e outro ao voltímetro.

A Figura 3-10 ilustra o porta-amostras tal como se apresenta atualmente.

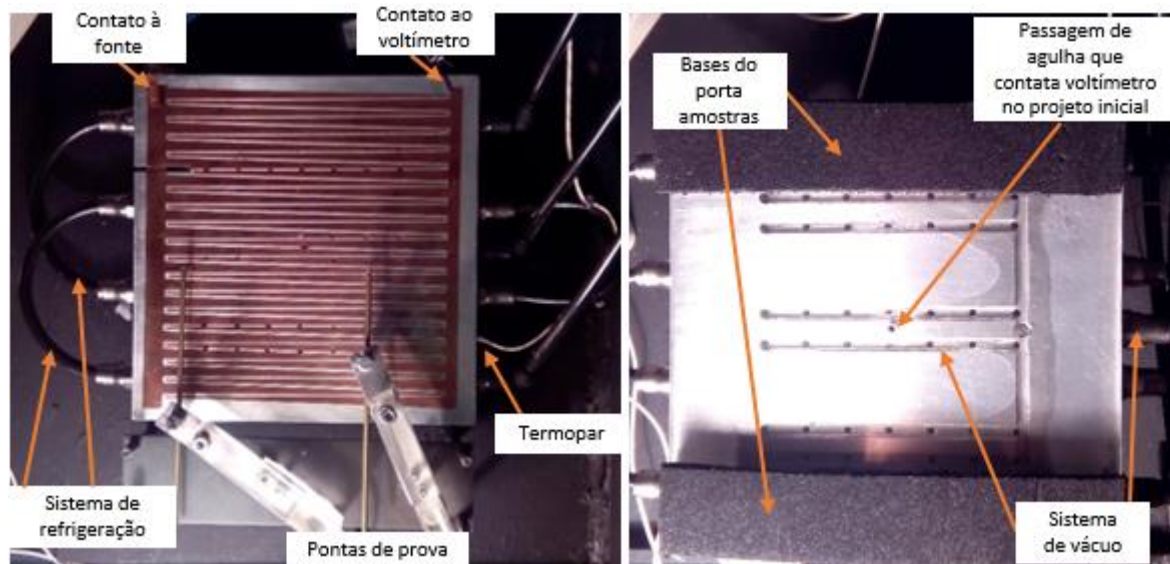


Figura 3-10: Face superior (esquerda) e inferior (direita) do porta-amostras.

Caixa estanque

O sistema tem como principal exigência a presença de um ambiente desprovido de qualquer iluminação, tendo sido para tal desenvolvida uma caixa estanque. Esta foi construída em madeira com dimensões de 40x40x60 cm³. A altura foi dimensionada de forma a conseguir-se adquirir imagens de células com 160x160 mm. Por dentro, a caixa foi totalmente pintada de preto.

A caixa apresenta no topo cinco perfurações: duas para passagem dos tubos de água do sistema de refrigeração (uma de entrada e outra de saída), uma para a passagem do tubo de ar correspondente ao sistema de vácuo, uma com a função de passa-cabos (contatos elétricos, termopar, cabo de alimentação da câmara e outros) e por último uma abertura para o encaixe da câmara.

Fotodetector Si-CCD

Todo o sistema montado foi pensado para a câmara CoolSamBa HR320, já existente no laboratório. No entanto, por motivo de avaria, mais tarde veio a ser necessário adaptar o sistema a uma nova câmara capaz de detetar imagens de eletroluminescência. Nesta altura, decidiu-se optar por uma solução mais económica tendo-se utilizado uma máquina fotográfica Nikon D40 já existente no laboratório.

i. CoolSamBa HR320

Esta câmara é especialmente desenvolvida para aplicações de detecção de imagens de luminescência de baixa intensidade. É equipada com um sensor *Kodak KAF full-frame Si-CCD* com uma resolução de 3,2 mega *pixel* (2184 x 1472). Cada *pixel* tem uma dimensão de 6,8 x 6,8 μm^2 .

A câmara vem ainda fornecida com um *software* de aquisição de imagem. A interfase deste *software*, bem como uma descrição detalhada de todos os parâmetros de aquisição, pode ser lida no anexo A.3.

A câmara é assente no topo da caixa estanque e fixada por quatro parafusos. Entre a câmara e a caixa foi utilizada uma esponja preta como isolante de forma a bloquear a entrada de luz na caixa. No interior, o porta-amstras foi colocado em cima de uma plataforma elevatória, com o objetivo de afastar ou aproximar a amostra da lente da câmara. A Figura 3-11 mostra o interior da caixa estanque com a estrutura montada para o sistema de EL, utilizando a câmara CoolSamBa HR320 ².



Figura 3-11: Montagem com a câmara CoolSamBa HR320.

ii. Nikon D40

O espectro de emissão do silício encontra-se na região do infravermelho. Uma vez que a maioria das máquinas fotográficas comuns, como a Nikon D40, possuem um filtro infravermelho, a utilização deste equipamento requer a remoção prévia deste filtro, de forma a conseguir captar imagens de luminescência de células solares de silício.

² A avaria da câmara deu-se numa fase inicial de testes, na qual o sistema não se encontrava totalmente funcional. Deste modo, na figura pode ver-se alguns componentes ainda não totalmente otimizados.

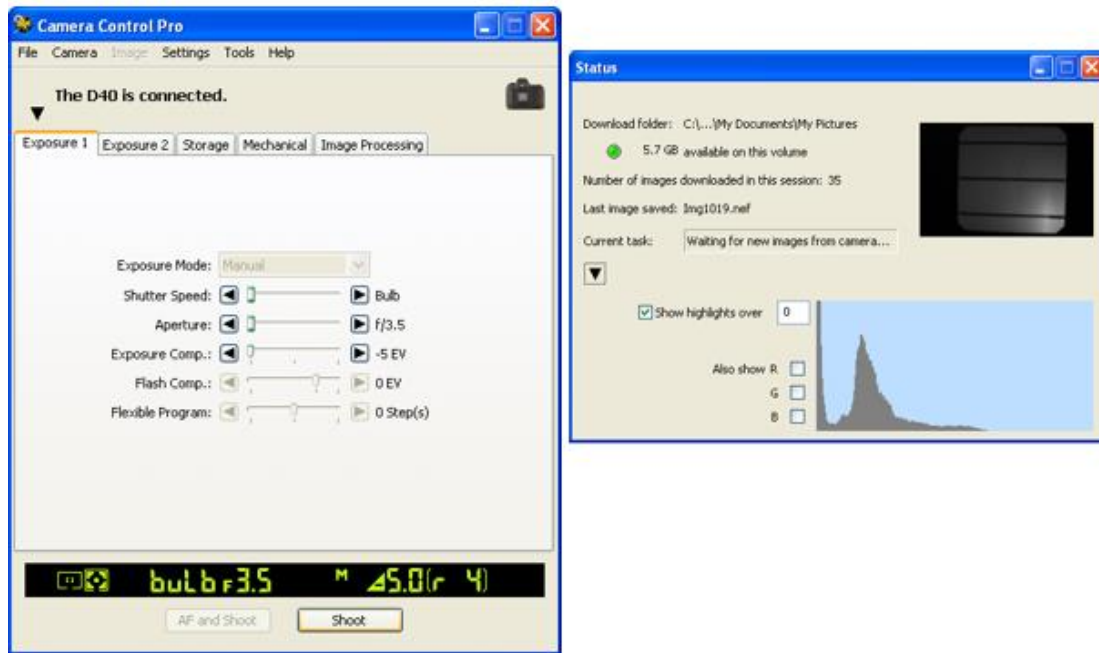


Figura 3-12: Interface do software da câmara Nikon D40.

A câmara possui a capacidade de foco automático, sendo equipada com um sensor Si-CCD de dimensão $23,7 \times 15,6 \text{ mm}^2$ com uma resolução de 6,1 mega *pixel*. Esta vem ainda equipada com um *software* de aquisição de dados disponibilizado pela Nikon.

A interface do programa, ilustrada na Figura 3-12, permite o controlo de diversos parâmetros como a abertura da lente, a sensibilidade ISO e o tempo de exposição. Para tempos de exposição superiores a 30s o *software* não permite um controlo remoto do disparo, sendo necessário colocar o parâmetro “*shutter speed*” na posição “*bulb*” e proceder a uma aquisição manual. Com esta finalidade, utilizou-se um pistão hidráulico acoplado à máquina que simula o disparo mecânico manual, possibilitando um controlo do tempo de exposição a partir do exterior da caixa. Este mecanismo, bem como o restante sistema, está ilustrado na Figura 3-13.

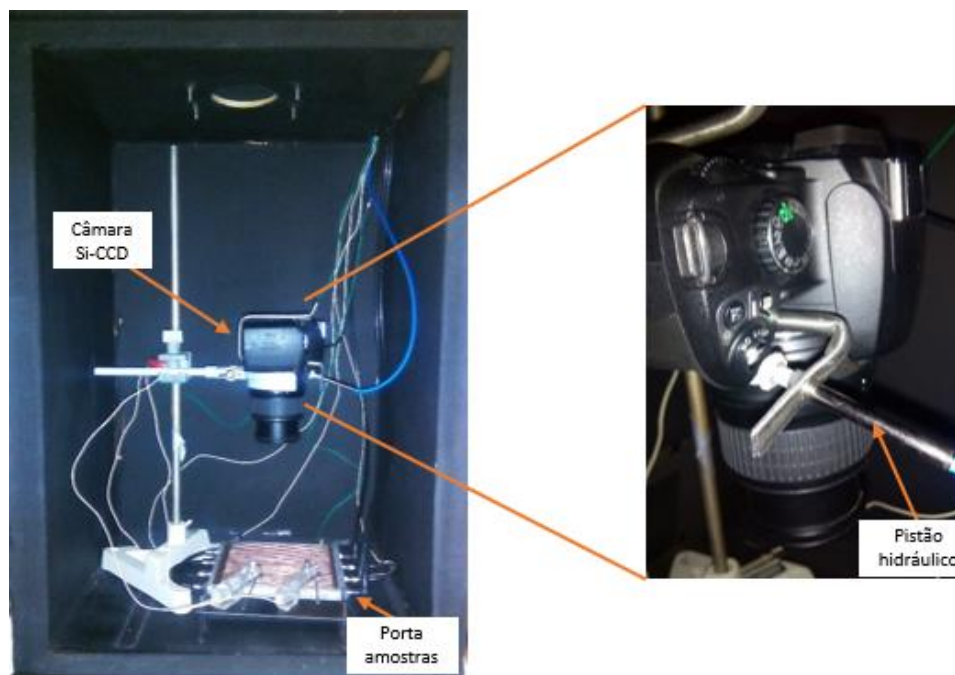


Figura 3-13: Montagem com a câmara Nikon D40.

Antes da aquisição de imagens é necessário proceder a um ajuste manual do zoom. De seguida, de modo a proceder à focagem, coloca-se a câmara no modo automático e faz-se uma aquisição utilizando o comando “*AF and Shoot*”. Depois de devidamente focada, coloca-se a câmara no modo manual, sendo as aquisições feitas utilizando o comando “*Shoot*”. Este passo é importante uma vez que em modo automático, sempre que se efetua uma aquisição, a máquina ativa um flash de modo a proceder à focagem, eliminando o efeito de escuridão pretendido.

Na adaptação do sistema à Nikon D40, foi necessário selar a abertura na parte superior da caixa estanque, retirar a plataforma elevatória e colocar a máquina presa a um suporte no interior da caixa. Nesta configuração, o ajuste da distância entre a célula e a objetiva é feito pelo deslocamento vertical da própria máquina e não do porta-amostras.

As imagens apresentadas nos resultados desta dissertação foram obtidas com recurso a esta câmara e utilizando esta montagem. A Figura 3-14 apresenta a configuração geral de todo o sistema.

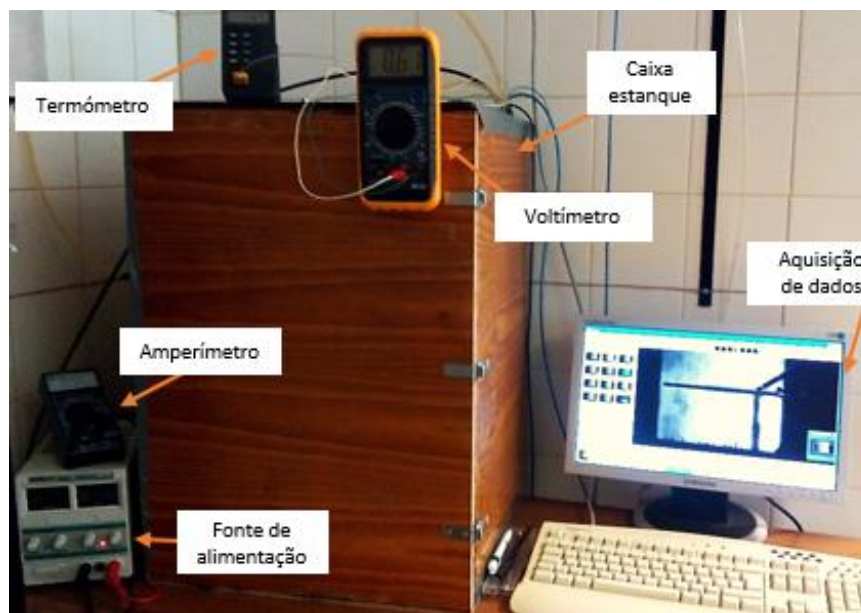


Figura 3-14: Sistema de aquisição de imagens de EL.

3.4 Termografia

Testes termográficos realizados em células e módulos fotovoltaicos têm sido largamente utilizados na última década por serem considerados um método de deteção de defeitos rápido, não destrutivo, simples e com custos reduzidos. Estes testes consistem na identificação de áreas com temperaturas elevadas (*hotspots*) em relação às restantes zonas. Utiliza-se para tal uma câmara termográfica capaz de detetar radiação infravermelha e converter essa intensidade de radiação numa imagem, de forma a fazer um mapeamento térmico da superfície em análise [17].

Os testes termográficos feitos em laboratório foram realizados apenas em células solares e segundo as mesmas condições dos testes de eletroluminescência, tendo sido adaptado para estas medidas o sistema experimental de EL já descrito acima.

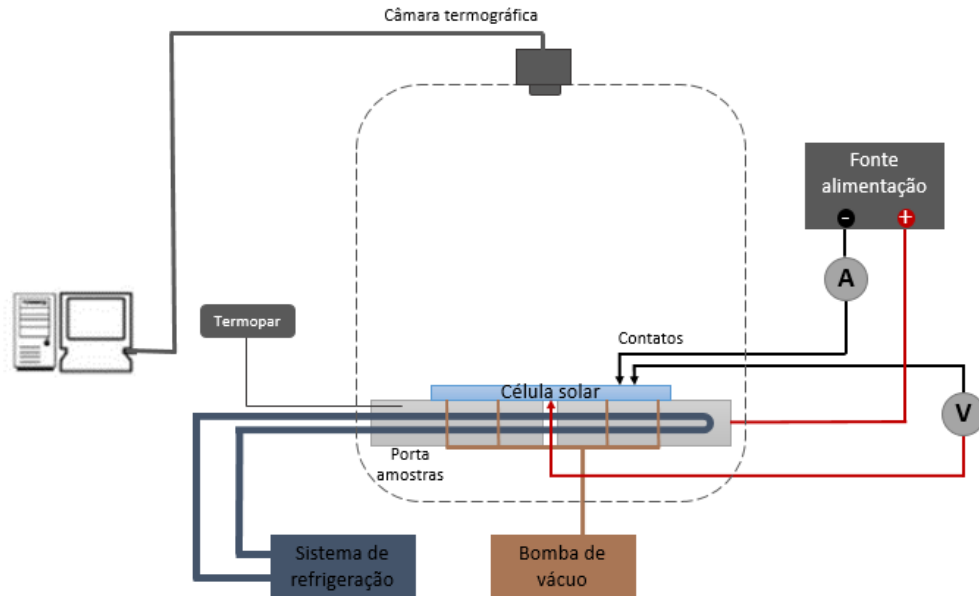


Figura 3-15: Sistema de aquisição de imagens de termografia.

A Figura 3-15 apresenta o esquema de montagem adaptado às medidas de termografia, no qual foi retirada a máquina usada na captação de imagens EL e substituída pela câmara termográfica, apoiada no topo da caixa. A câmara termográfica utilizada foi a Xenics GOBI-2833 com um sensor de silício amorfo e uma resposta espectral na gama 4-14 μm . Neste sistema não há a necessidade de estanquicidade à luz, uma vez que a câmara termográfica detecta a radiação infravermelha e não a visível.

4 Procedimento e Resultados experimentais

O estudo apresentado foi efetuado em células industriais de silício mono e multicristalino do tipo-p, fornecidas pela Open Renewables, e em células de silício monocristalino do tipo-p produzidas no laboratório de investigação PV da empresa Air Liquide, em França. Todas as células têm uma dimensão de 156x156 mm² e apresentam diversos defeitos.

As figuras Figura 4-1 e Figura 4-2 apresentam, respetivamente, um exemplo de células mono e multicristalinas fornecidas pela Open Renewables. As faixas mais claras na face inferior das células correspondem a suportes de contatos, utilizados na ligação à célula vizinha nos módulos fotovoltaicos.

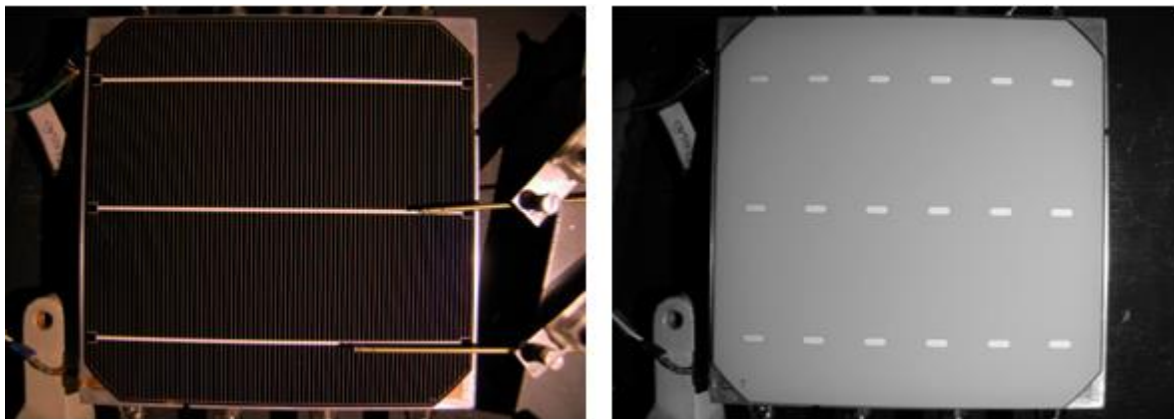


Figura 4-1: Célula monocristalina M2. Face superior (esquerda) e inferior (direita).

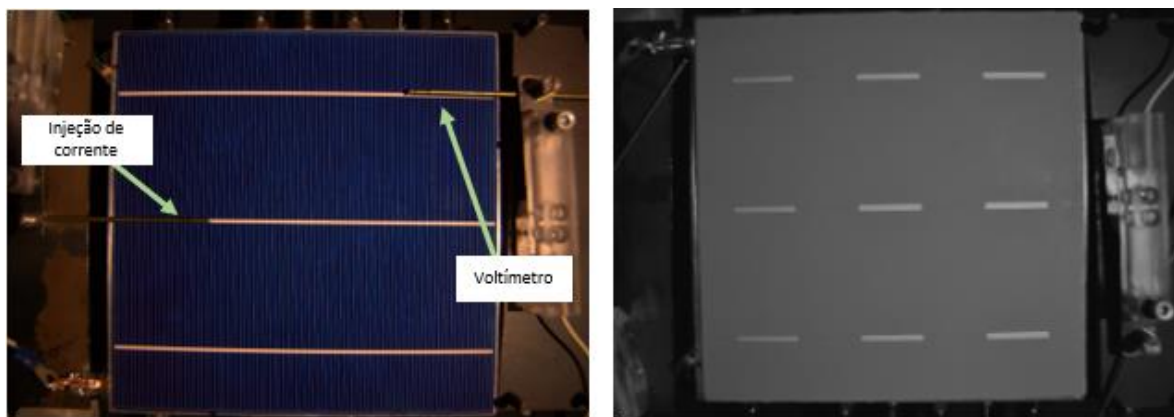


Figura 4-2: Célula multicristalina P1. Face superior (esquerda) e inferior (direita).

A Figura 4-3 corresponde a uma das células monocristalinas fornecidas pelo laboratório de França. Ao contrário das células da Open Renewables, estas não possuem suportes de contacto, apresentando uma metalização homogênea na face inferior. Por observação direta, nos contornos desta face é possível observar pequenas nervuras (assinaladas a vermelho na figura), indicando falhas no processo de metalização do contato inferior. É ainda possível identificar a presença de uma fissura, assinalada a azul. Estes defeitos são facilmente identificados nas imagens de eletroluminescência apresentadas mais adiante.

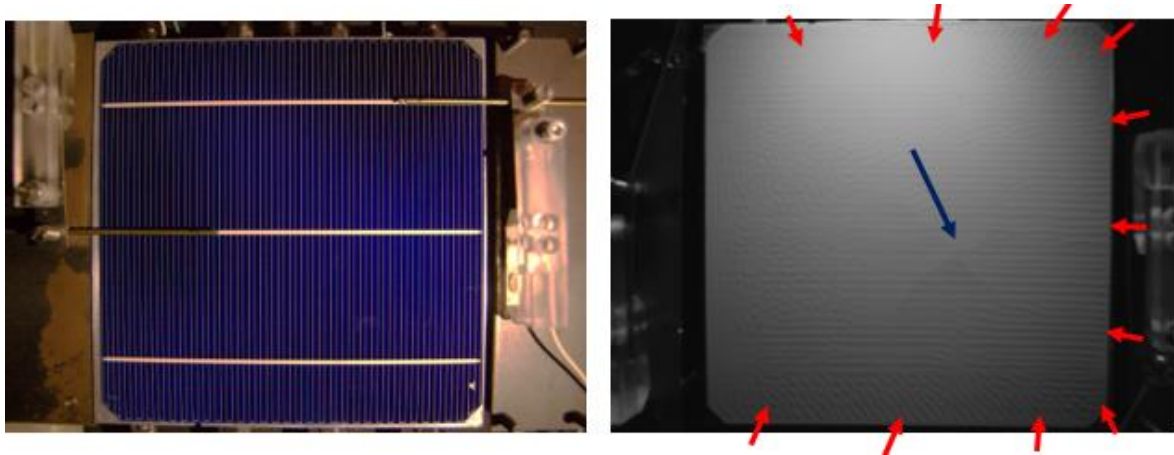


Figura 4-3: Célula monocristalina F2. Face superior (esquerda) e inferior (direita).

A metodologia utilizada na identificação das células, agrupa-as nos três grupos acima mencionados, conforme apresentado de seguida:

- Mx – Células monocristalinas da Open Renewables;
- Px – Células multicristalinas (ou policristalinas) da Open Renewables;
- Fx – Células monocristalinas do laboratório de França.

Em que \underline{x} corresponde à numeração da célula.

4.1 Identificação de defeitos

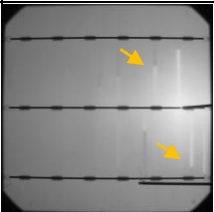
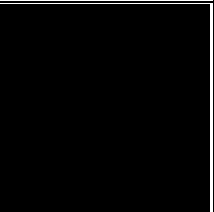


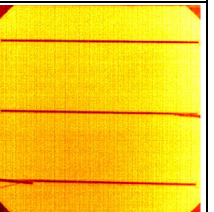
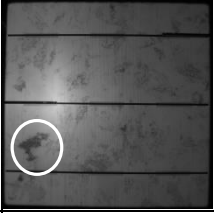
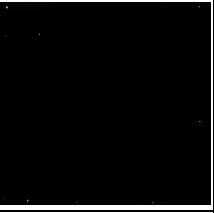
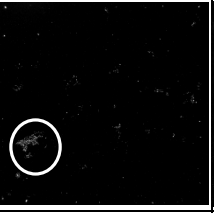
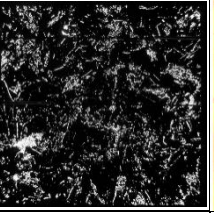
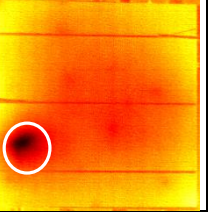
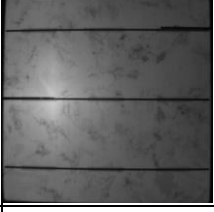

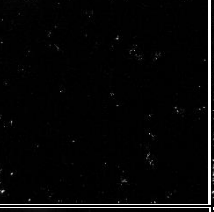
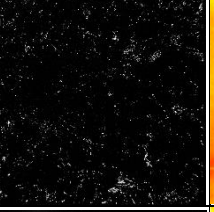
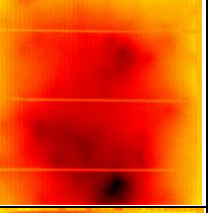
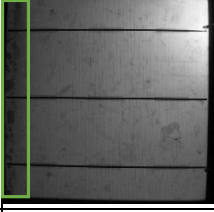

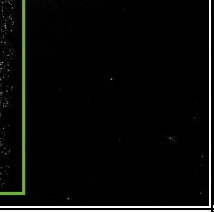
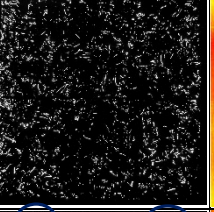
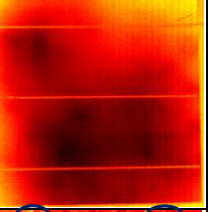
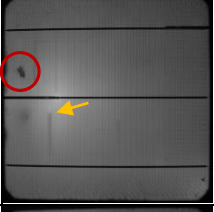
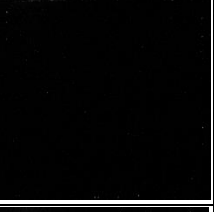
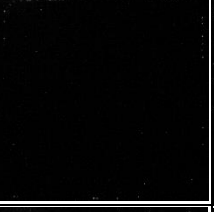
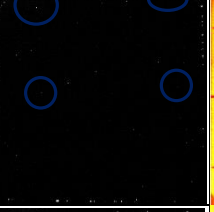
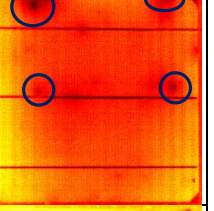
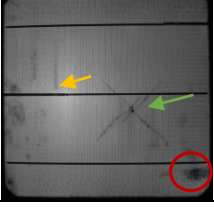

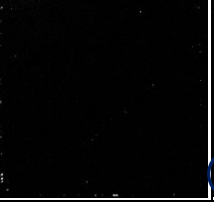
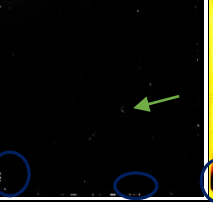
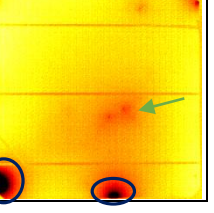
Uma vez que as células fornecidas para este projeto apresentavam diversos defeitos, o estudo iniciou-se com a caracterização via eletroluminescência e termografia de todas as amostras recebidas. Em polarização direta, as células foram injetadas com uma corrente de 1 A, com tensão aproximada de +0,6 V. Já em polarização inversa, ReBEL, foi feito um varrimento da tensão desde os -4 V até aos -18 V, com intervalos de 2 V. A escala destas imagens de eletroluminescência vai do preto (mínimo) ao branco (máximo) em unidades arbitrárias, mas os tempos de exposição e restantes parâmetros de captura são idênticos em todas as aquisições: 6 min nas imagens de polarização direta e 15 min nas imagens de polarização inversa. As imagens de termografia foram obtidas com as mesmas condições das imagens de eletroluminescência, procedendo a aquisições com o mesmo varrimento de tensões utilizado na ReBEL e na polarização direta.

Dado que os equipamentos de medida de curvas I-V (simulador solar) e de resposta espectral, existentes no laboratório, não permitem estudar células de grandes dimensões, numa primeira fase, o estudo limitou-se à comparação entre as imagens de eletroluminescência e de termografia.

Neste relatório apresentam-se apenas os resultados de algumas células selecionadas. A seleção foi feita de modo a apresentar todos os tipos de defeitos encontrados sem tornar a lista demasiado exaustiva. Na Tabela 4-1 encontram-se então três células monocristalinas e três células multicristalinas. A primeira coluna corresponde às imagens EL em polarização direta, as três colunas seguintes às imagens EL em polarização inversa (ReBEL) e a última coluna às imagens de termografia.

As imagens EL pertencentes à primeira coluna apresentam todas uma zona de luminescência acentuada, correspondente ao ponto de injeção de corrente. Relativamente às imagens de termografia, é importante referir que não é possível identificar a dimensão do defeito, uma vez que o calor se dissipa de forma muito rápida em torno do ponto de perda de potência, provocando a ideia de um *hotspot* cada vez maior.

Tabela 4-1: Imagens de eletroluminescência e termografia de células mono e multicristalinas. Células de 156x156 mm.

	EL +0,6 V	EL -8 V	EL -12 V	EL -16 V	Termografia ≤ -14 V
M2 (p-mono)					
P1 (p-poli)					
P2 (p-poli)					
P4 (p-poli)					
F1 (p-mono)					
F2 (p-mono)					

As células monocristalinas fornecidas pela Open Renewables, exemplificadas na Tabela 4-1 pela célula M2, apresentam apenas defeitos devidos a dedos cortados (identificados por setas amarelas). Nas imagens EL em polarização direta, estas zonas de interrupção resultam no escurecimento das zonas posteriores à zona de corte. Tal deve-se à quebra localizada na injeção de corrente e consequente diminuição da geração de portadores de carga e taxa de recombinação radiativa. No que diz respeito às imagens de termografia e ReBEL, nestas mesmas células não foram identificados quaisquer defeitos.

Relativamente às células multicristalinas estudadas, como a P2, estas apresentam em determinados cristais e fronteira de grão uma luminescência reduzida em polarização direta. Esta heterogeneidade é atribuída a zonas de recombinação não radiativa provocadas pela presença de

aglomerados de impurezas em determinados grãos ou fronteiras de grão, ou devido à existência de deslocamentos na rede cristalina. A célula P1 apresenta uma zona de particular interesse, destacada a branco, uma vez que o defeito é bastante visível nos três tipos de imagens captadas. Para além disso, contrariamente às restantes heterogeneidades, o defeito torna-se bastante visível logo aos -12V, sugerindo a presença de um defeito do tipo II. Estes defeitos caracterizam-se pela presença de precipitados contendo metais que se encontram nas fronteiras de grão do silício multicristalino, constituindo centros de recombinação. A imagem termográfica demonstra ainda a presença de um intenso *hotspot* localizado. Passando para a célula P4, esta apresenta um defeito visível nas imagens de EL ao longo de toda a lateral esquerda, embora não seja visível na imagem de termografia. Numa análise inicial, aponta-se para um problema no processo de produção da célula, nomeadamente má difusão de fósforo no emissor ou uma má deposição da camada passivadora de nitreto de silício. Tanto este defeito como o identificado na célula P1 serão analisados com maior detalhe mais adiante, recorrendo às curvas de I-V e de resposta espectral.

Como seria de esperar, a presença de curto-circuitos é facilmente identificada através do surgimento de *hotspots* nas imagens de termografia. Em células monocristalinas, como a F1 e a F2, é bastante clara a correspondência entre as imagens de termografia e as imagens ReBEL relativamente a este tipo de defeitos (circunferências azuis na Tabela 4-1), no entanto, quando se trata apenas de pequenos curto-circuitos localizados, não existe correspondência com as imagens de EL em polarização direta. Na célula F2 é ainda possível identificar a presença de fissuras (setas verdes na Tabela 4-1) visíveis nas imagens EL em polarização direta, nas imagens ReBEL, e nas imagens de termografia.

Por fim, defeitos relacionados com a metalização podem ser observados nas células F1 e F2, identificados pelos círculos vermelhos. Estes defeitos não são observados nas imagens ReBEL e de termografia, no entanto, no caso da célula F1 o defeito é visível a olho nu na superfície frontal da célula, sugerindo um problema na metalização frontal.

A Figura 4-4 mostra com maior detalhe imagens EL em polarização direta de uma célula monocristalina do laboratório de França, F2, e uma multicristalina da Open Renewables, P1. Os estudos seguintes foram efetuados apenas nestes dois grupos de células.

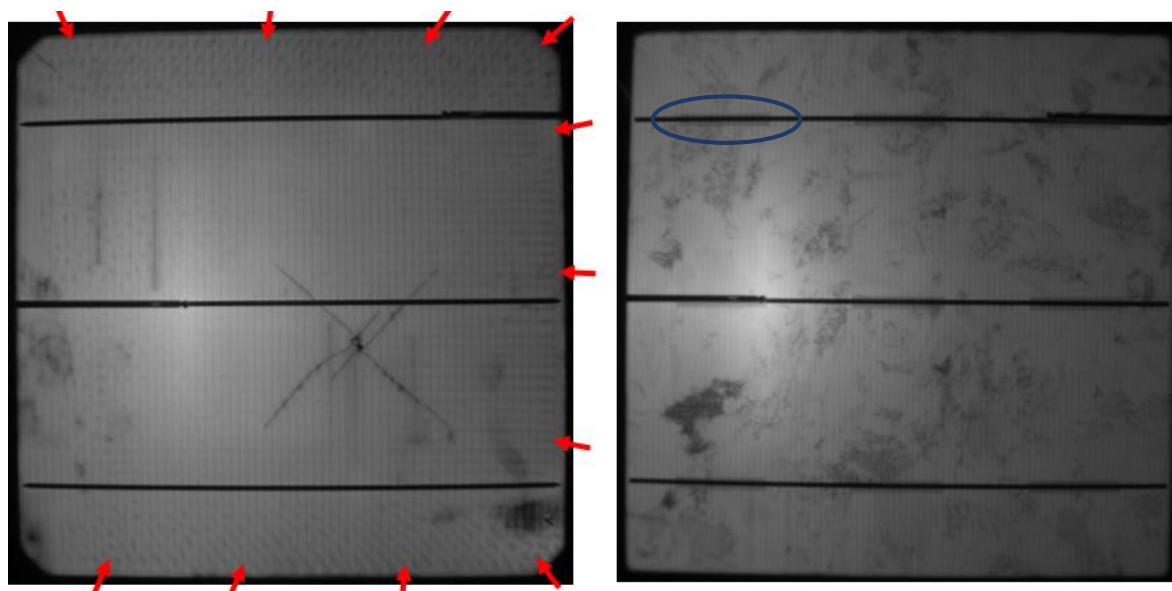


Figura 4-4: Eletroluminescência da célula F2 (esquerda) e P1 (direita).

Em ambas as imagens é visível toda a estrutura de contatos superiores da célula: dedos e *busbars*. Relativamente aos contatos inferiores, a vermelho estão identificados os problemas relacionados com a metalização inferior nas células de França, tal como observado anteriormente a olho nu na Figura

4-3, e a azul destaca-se o efeito dos suportes de contato nas imagens EL das células da *Open Renewables*.

Corte com laser

O número de células disponibilizadas para este projeto previa-se reduzido, tendo em conta que se pretendia realizar um vasto estudo de introdução de defeitos em células solares, nomeadamente a contaminação por PID. Por este motivo, após o estudo de caraterização apresentado, as células foram sujeitas a um corte de laser, dividindo cada uma em quatro partes idênticas com uma dimensão aproximada de 78x78 mm. A orientação do corte está esquematizada a tracejado na Figura 4-5.

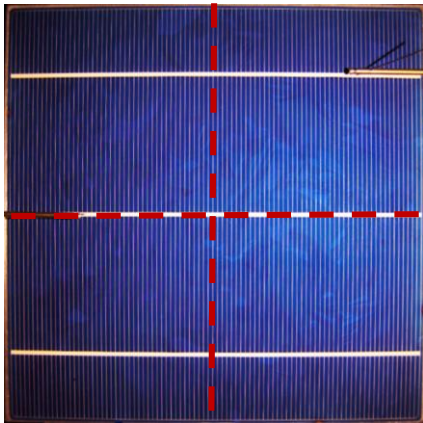
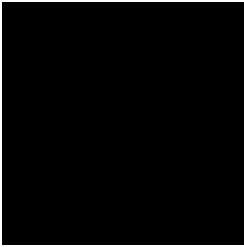
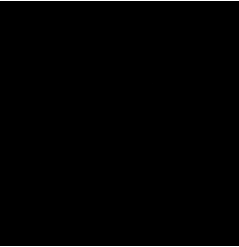
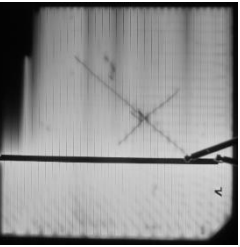
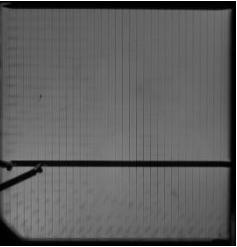
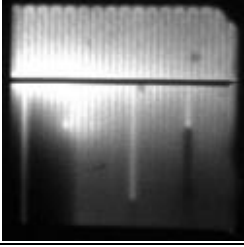
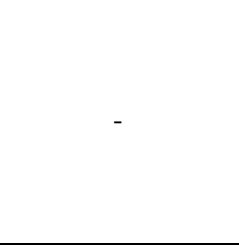
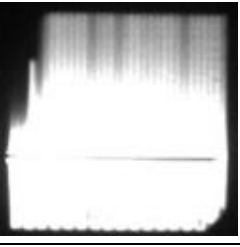
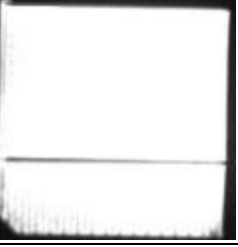


Figura 4-5: Esquema de corte com laser aplicado nas células.

De seguida, as células foram novamente caraterizadas com recurso à técnica de eletroluminescência. Desta vez a caracterização foi feita tanto em ambiente laboratorial, na FCUL, como em ambiente industrial, na *Open Renewables*. No laboratório, as células foram expostas a uma corrente de 1 A e tempo de exposição de 5min, enquanto que na *Open Renewables* foram expostas durante 2 s a 8 A. A Tabela 4-2 apresenta, de forma comparativa, os resultados obtidos para a célula P1 e F1.

Tabela 4-2: Imagens EL em ambiente laboratorial vs industrial após corte com laser. Células de 78x78 mm.

		P1_1	P1_2	P1_3	P1_4
P1 (p-poli)	FCUL				
	Open Renewables		-		

F1 (p-mono)		F1_1	F1_2	F1_3	F1_4
					
	Open Renewables				

As células começaram por ser caracterizadas na Open Renewables e só depois no laboratório da FCUL. Defeitos como fissuras, visíveis nas células P1_1 e F1_3, e cantos partidos, visíveis nas células P1_2 e P1_3, foram induzidos de forma involuntária no intervalo entre as duas caracterizações, não sendo tomados em consideração na comparação entre os dois sistemas de medida. As células P1_2 e F1_2 não foram caracterizadas na Open Renewables.

Comparando as imagens obtidas em ambiente laboratorial e ambiente industrial, rapidamente se percebe que em laboratório se conseguem imagens com maior definição e detalhe. Isto ocorre porque a Open Renewables utiliza um sistema de medida integrado na linha de montagem, otimizado para medir módulos fotovoltaicos. Deste modo, são injetados 8 A durante 2 s num quarto de célula quando os mesmos deveriam ser aplicados num módulo, resultando em imagens muito saturadas devido à elevada luminescência. Em laboratório, o sistema permite um maior controlo sobre a intensidade de corrente aplicada e ainda a utilização de tempos de exposição mais longos, obtendo-se imagens com maior definição.

A Tabela 4-2 permite-nos ainda avaliar o desempenho do uso do laser como técnica de corte. Este verificou-se ser um método muito invasivo, provocando sérios danos na célula e, em alguns casos, danificando-a por completo. Este impacto é maioritariamente visível nas células monocristalinas, através do escurecimento de algumas zonas. Analisando a célula F1, percebe-se que cada quarto da célula foi afetado de forma diferente, obtendo-se nas células F1_1 e F1_2 a quase inexistência de luminescência, na célula F1_3 um escurecimento apenas junto às zonas de corte (face superior e face esquerda) e na célula F1_4 uma luminescência uniforme. Por observação das diversas células caracterizadas, concluiu-se que os defeitos induzidos durante o processo de corte são mais acentuados nas células em que o corte foi feito por cima da *busbar*. Posto isto, foram levantadas duas hipóteses para o sucedido: contaminação das células por difusão da prata existente nos contactos; ou criação de curto-circuitos entre o contacto superior e inferior da célula.

De forma a conseguir perceber o tipo de degradação introduzida nas células, estas foram novamente cortadas, no entanto, desta vez recorreu-se a um disco diamantado, associado a um berbequim, como ferramenta de corte.

Corte com disco diamantado

A realização de um novo corte teve como objetivo não só isolar as zonas de possíveis curto-circuitos provocados durante o corte com laser, mas também a preparação das amostras de forma a poderem ser caracterizadas pelo sistema de curvas I-V e de resposta espectral.

Cada quarto de célula foi novamente dividido em várias partes, consoante o tipo de defeito em estudo. A célula F1_1, sendo uma das mais afetadas durante o processo de corte com laser, foi dividida em quatro partes iguais, com dimensões aproximadas de 49x49 mm². A Figura 4-6 esquematiza a orientação do corte efetuado com o disco diamantado (tracejado branco) e identifica os bordos que sofreram a ação do laser (tracejado vermelho).

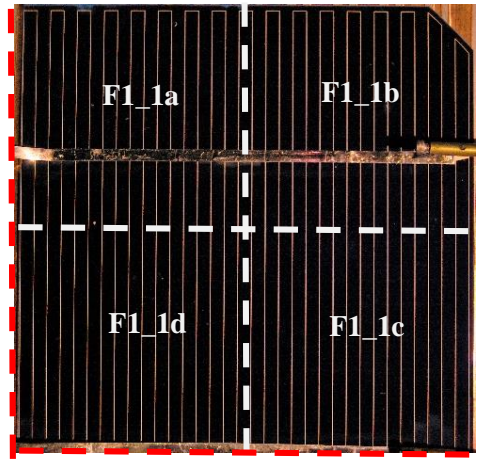


Figura 4-6: Esquema de corte aplicado na célula F1_1.

Cada uma das quatro novas células, identificadas na Figura 4-6, foram caraterizadas por eletroluminescência. Estas foram percorridas por uma corrente de 0,5 A durante 3 min, obtendo-se os resultados apresentados na Tabela 4-3.

Tabela 4-3: Imagens EL da célula F1_1 após corte com disco diamantado. Células de 39x39 mm.

	F1_1a	F1_1b	F1_1c	F1_1d
F1_1 (p-mono)				

Conforme observado anteriormente na Tabela 4-2, a célula F1_1 apresentava EL nula segundo a caraterização feita em laboratório e, apenas sob correntes muito elevadas, conforme registado na imagem da Open Renewables, apresentava alguma luminescência. Na Tabela 4-3 observa-se o aparecimento de diferentes zonas de luminescência após o corte com disco diamantado. A metade da célula F1_1, correspondente à F1_1c e F1_1d, que estava em contato com a *busbar* cortada com *laser*, permanece a preto nas imagens EL, enquanto a outra metade da célula já se apresenta luminescente. A célula F1_1b é a única que não tem nenhuma superfície em contato com as zonas de ação do laser e, por esse motivo, é a mais luminescente. Estes resultados vêm confirmar a ideia da criação de curto-circuitos e parecem refutar a hipótese de existir uma forte recombinação generalizada, devido à contaminação da célula por difusão de prata aquando do corte de laser sobre a *busbar* da célula F1, uma vez que ao se isolarem as zonas de curto-circuito as restantes zonas da célula voltam a ter luminescência. No entanto, junto às *busbars* cortadas pode existir em simultâneo curto-circuitos entre a base e o emissor e contaminação com prata ou outras impurezas existentes na superfície da célula.

Os resultados fornecidos pela EL encontram-se de acordo com o obtido nas curvas I-V e de resposta espectral. O gráfico da Figura 4-7 apresenta em simultâneo as curvas I-V obtidas com o simulador solar e com o Suns-Voc, expondo a azul as curvas correspondentes à célula F1_1a, a verde à célula F1_1b e a amarelo à célula F1_1c. Na Tabela 4-4 encontram-se os respetivos parâmetros das células solares obtidos a partir destas curvas.

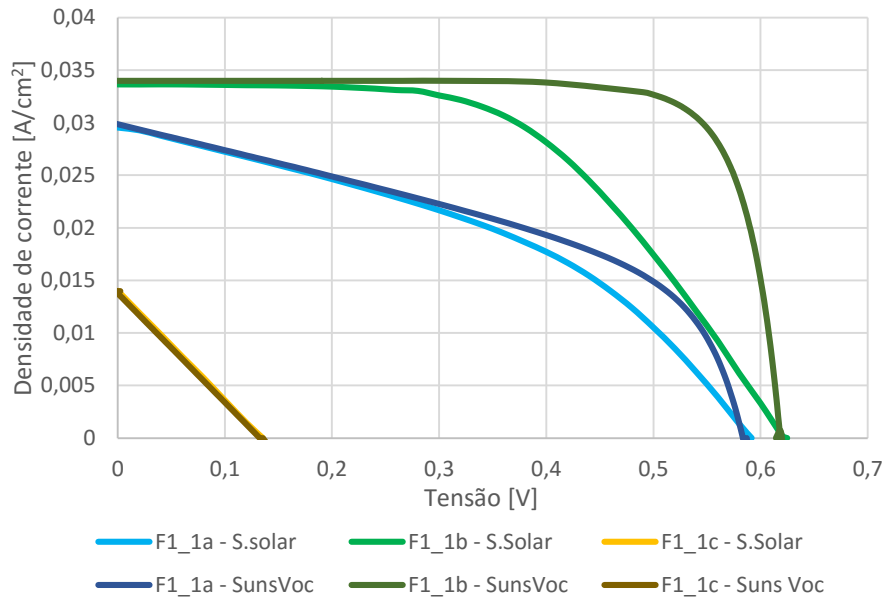


Figura 4-7: Curva I-V das células F1_1a, F1_1b e F1_1c.

Tabela 4-4: Parâmetros retirados das curvas I-V obtidas com o simulador solar e com o Suns-Voc.

		V_{mp} [V]	J_{mp} [A/cm ²]	V_{oc} [V]	J_{sc} [A/cm ²]	FF	η [%]	R_s [Ω .cm ²]	R_p [Ω .cm ²]
I-V S. solar	F1_1a	0,40	0,02	0,59	0,030	0,41	7,1	8,6	51,8
	F1_1b	0,40	0,03	0,62	0,034	0,54	11,3	7,5	793,7
	F1_1c	0,06	0,01	0,14	0,014	0,25	0,5	9,9	9,6
I-V Suns-Voc	F1_1a	0,44	0,018	0,58	-	0,45	7,9	2,5	54,7
	F1_1b	0,53	0,032	0,62	-	0,79	16,6	1,0	577,1
	F1_1c	0,07	0,007	0,13	-	0,25	0,5	9,6	7,4

As diferenças observadas entre as curvas medidas com o simulador solar e o Suns-Voc encontram-se apenas no impacto da resistência série no gráfico, ou seja, no declive junto ao V_{OC} . A resistência de curto-circuito não varia significativamente entre as duas medidas para uma mesma célula. Tal acontece porque o sistema de Suns-Voc efetua a medida em circuito aberto, sendo necessária a introdução prévia do valor de J_{sc} , obtido com o simulador solar, no *software* de forma a traçar a curva I-V. Posto isto, o fator de forma e o rendimento obtido por este sistema, correspondem à performance da célula caso a resistência série fosse nula, sendo por isso sempre superiores aos medidos com o simulador solar. Por este motivo, dizem-se pseudo-FF e pseudo-eficiência. É ainda importante referir que o valor calculado da resistência série no Suns-Voc corresponde apenas ao valor aparente, e não ao real medido.

Analisando as curvas em questão, constata-se que estas vão ao encontro do esperado. A célula F1_1c, cortada com laser sob a *busbar*, apresenta-se completamente danificada devido à sua muito baixa resistência de curto-circuito que, conseqüentemente, afeta em primeiro lugar o FF e posteriormente o V_{OC} . O baixo valor de J_{sc} atribui-se ao elevado valor de R_s , que é superior ao das outras células. Na verdade, neste caso o modelo de descrição da célula deixa de funcionar devido aos graves problemas que a célula apresenta, deixando de ser, em rigor, uma célula solar.

As células F1_1a e F1_1b apresentem resistências série semelhantes, no entanto, a diferença de valores observada traduz-se na redução do J_{sc} na célula F1_1a em relação à F1_1b. A resistência de curto-circuito na célula sem faces exposta ao efeito do corte com laser, F1_1b, é consideravelmente superior à resistência de curto-circuito da célula F1_1a. Tal reflete-se no aumento do FF e da eficiência da célula cortada apenas com o disco diamantado.

Partindo da curva I-V no escuro, Figura 4-8 à esquerda, traçou-se o gráfico logarítmico desta curva, Figura 4-8 à direita, de onde posteriormente se extraíram os valores da corrente de saturação, apresentados na Tabela 4-5.

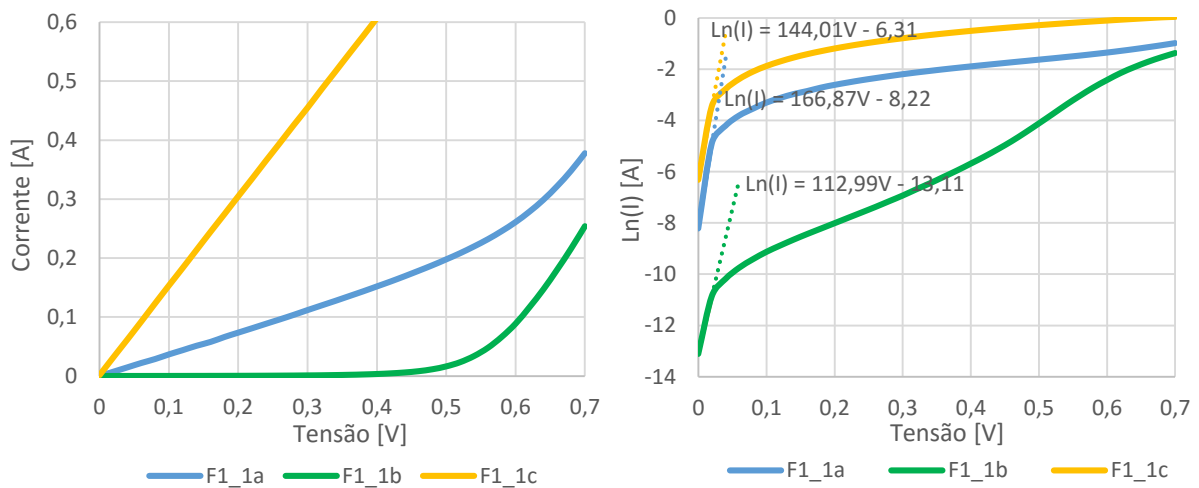


Figura 4-8: Curva I-V no escuro e gráfico logarítmico da curva I-V no escuro para as células F1_1a, F1_1b e F1_1c.

Tabela 4-5: Correntes de saturação das células F1_1a, F1_1b e F1_1c.

	J_0 [A/cm ²]
F1_1a	$1,73 \times 10^{-5}$
F1_1b	$1,35 \times 10^{-7}$
F1_1c	$1,24 \times 10^{-4}$

Este parâmetro corresponde a uma medida da taxa de recombinação da célula, apresentando-se superior na célula F1_1c, seguida da F1_1a e, por fim, da F1_1b. Valores elevados de J_0 , são indicativos de que a célula apresenta muitos defeitos ou contaminações, afetando o V_{OC} e FF.

Por fim, foram traçados os perfis das curvas de EQE, Figura 4-9, para estas mesmas células.

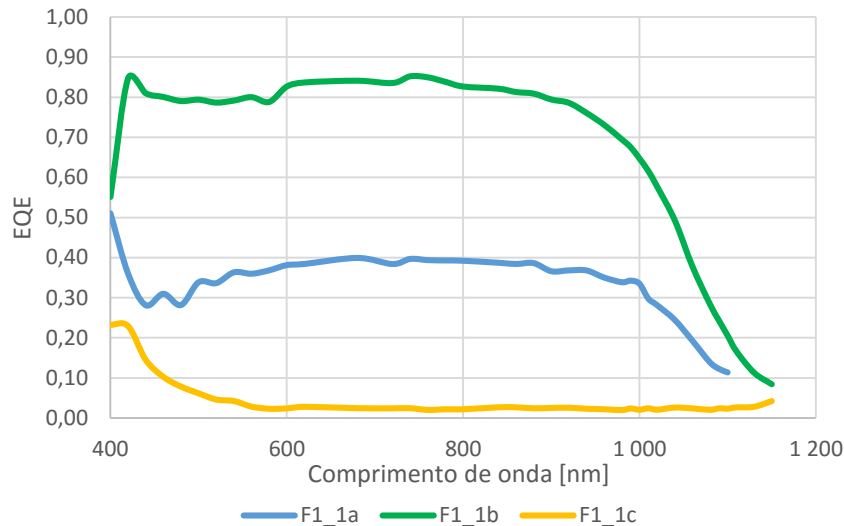


Figura 4-9: Curvas EQE das células F1_1a, F1_1b e F1_1c.

Comparando as curvas, uma vez mais está evidenciada a distinção entre as células F1_1a e F1_1b, sendo que a F1_1b demonstra um melhor desempenho. Tal como descrito na secção 3.2 desta dissertação, partindo do gráfico EQE e do gráfico de refletância (anexo A.4), foram calculadas as EQI e posteriormente o comprimento de difusão dos portadores minoritários, através do inverso do declive do gráfico de RQI^{-1} em função de α^{-1} , apresentado na Figura 4-10.

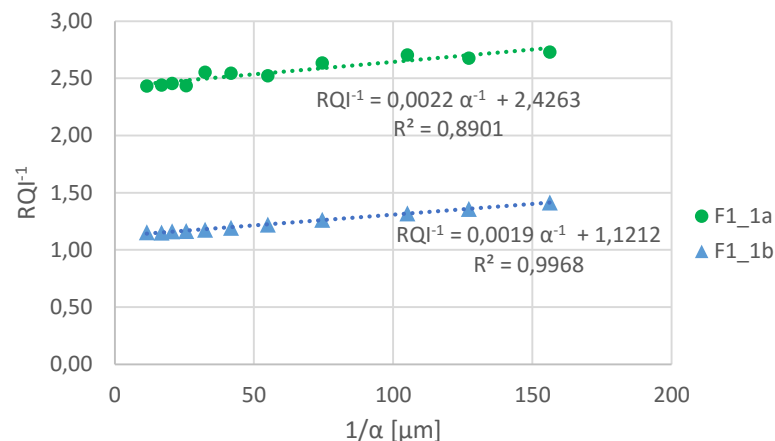


Figura 4-10: Gráfico de RQI^{-1} em função de α^{-1} para as células F1_1a e F1_1b.

Tabela 4-6: Comprimento de difusão das células F1_1a e F1_1b.

	L_e [μm]
F1_1a	454,5
F1_1b	526,3

Uma vez que a célula F1_1c, se apresenta completamente danificada, não foram calculados os comprimentos de difusão para esta célula. Os comprimentos de difusão obtidos para as células F1_1a e F1_1b são muito superiores à espessura da célula e, por isso, os valores obtidos não são precisos.

No entanto, fazendo uma análise comparativa, o valor obtido para a célula F1_1b é superior ao obtido na célula F1_1a, indicando maiores tempos de vida e consequentemente menores taxas de recombinação, tal como observado anteriormente nos valores de J_0 . Os resultados obtidos da resposta espectral em conjunto com os valores de J_0 mostram que a célula não tem apenas problemas de curto-circuito, estão também contaminadas possivelmente com prata proveniente dos contatos. A maior taxa de recombinação identificada na célula F1_1a em relação à F1_1b, deve-se ainda ao aumento de recombinação de superfície provocado pelo corte de três das quatro faces da primeira célula em relação a apenas duas faces na segunda célula.

Em suma, ficou confirmado que a utilização do laser de corte nas células solares se pode revelar bastante prejudicial devido à criação de fortes curto-circuitos entre o contato superiores e o contato inferior e também devido à contaminação localizada com metais, tendo um maior impacto quando aplicado diretamente sobre as *busbars*. Embora este sistema de corte se tenha revelado bastante destrutivo, é possível isolar as zonas afetadas aplicando um novo corte. A utilização de um disco diamantado constitui um método alternativo muito menos invasivo, embora seja menos preciso na orientação do corte e leve ao aparecimento de pequenas fissuras no contorno da célula durante o processo de corte. Deste modo, o disco diamantado foi a técnica de corte utilizada nas células a seguir estudadas.

Para analisar os defeitos já identificados na Tabela 4-1, as células F2, P1 e P4 foram cortadas com o disco diamantado, de forma a selecionar algumas zonas de interesse. Tendo em conta as limitações do simulador solar e do sistema de resposta espectral, as zonas em estudo foram cortadas com uma dimensão aproximada de 35x35 mm².

A Figura 4-11 apresenta a imagem EL da célula F2 com o esquema de cortes a que foi sujeita. Primeiramente foi dividida em quatro partes pelo laser de corte (a vermelho), e posteriormente aplicou-se um corte com o disco diamantado (a branco). A imagem EL, destacada à direita, corresponde à célula F2_3b. Esta foi percorrida por uma corrente de 0,5 A durante 3 min na aquisição da imagem de eletroluminescência apresentada.

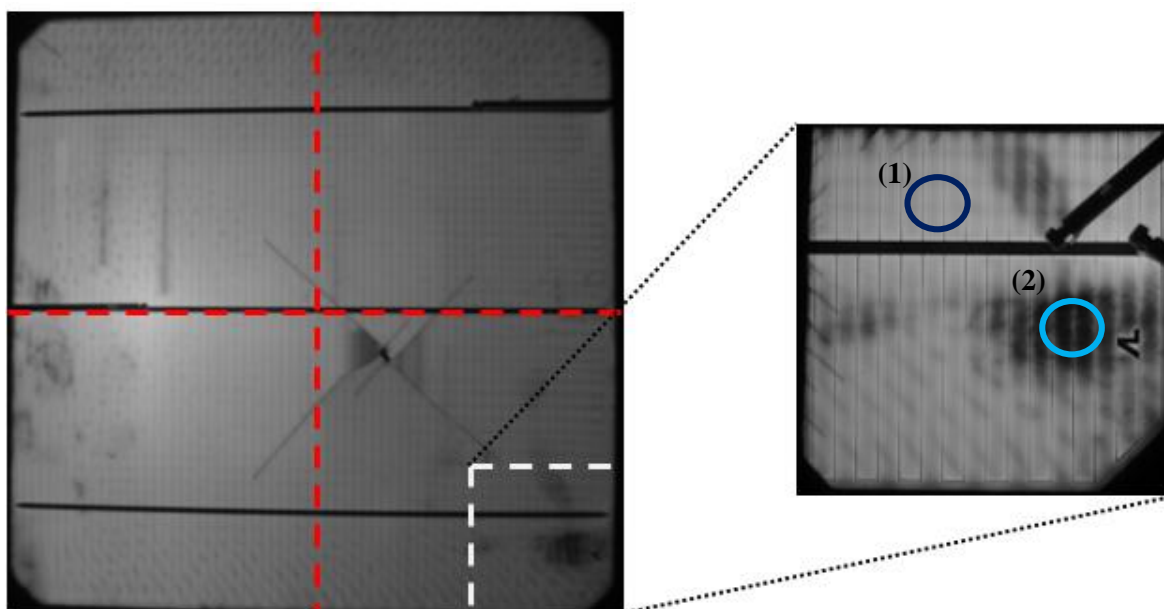


Figura 4-11: Esquema de corte aplicado à célula F2 e destaque, à direita, da região F2_3b.

Anteriormente, o defeito assinalado a azul claro na Figura 4-11 foi atribuído a possíveis problemas na metalização da célula. Posto isto, o estudo de caracterização foi aprofundado traçando a curva I-V com recurso ao simulador solar, Suns-Voc e curva I-V no escuro, a partir das quais se retiraram os

parâmetros da célula. Posteriormente, comparou-se a eficiência quântica interna medida na zona do defeito, assinalada a azul claro, com a medida numa zona sem defeitos aparentes, assinalada a azul escuro, e calcularam-se os respectivos comprimentos de difusão dos portadores minoritários.

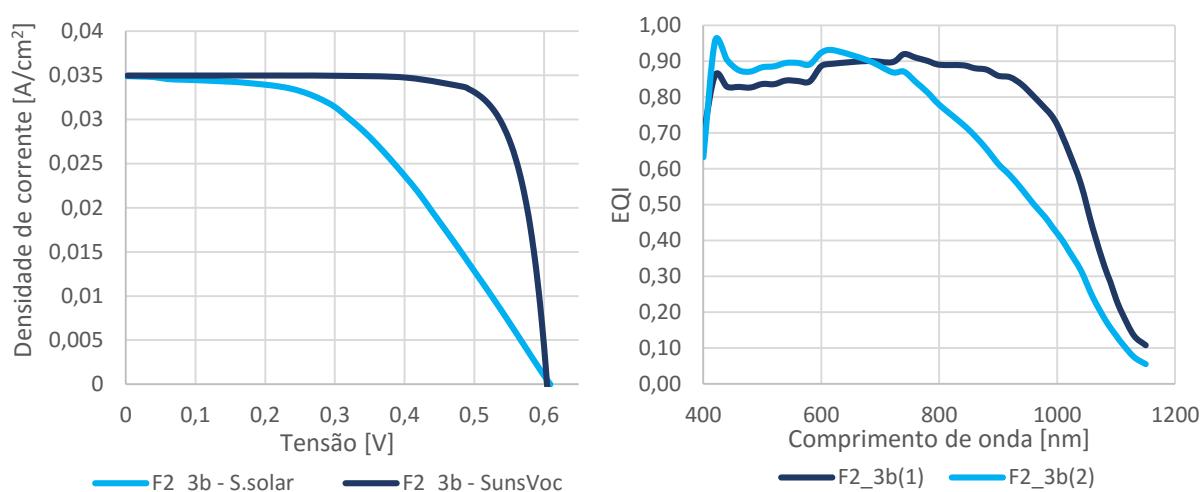


Figura 4-12: Curvas I-V provenientes do simulador solar e do Suns-Voc e curva EQI para dois pontos da célula F2_3b.

Tabela 4-7: Parâmetros retirados das curvas I-V da célula F2_3b.

	V_{mp} [V]	J_{mp} [A/cm²]	V_{oc} [V]	J_{sc} [A/cm²]	FF	η [%]	R_s [Ω.cm²]	R_p [Ω.cm²]	J_0 [A/cm²]
I-V S.solar	0,36	0,027	0,61	0,035	0,46	9,80	8,48	419,44	-
I-V Suns-Voc	0,51	0,033	0,61	-	0,78	16,60	1,02	555,22	-
I-V escuro	-	-	-	-	-	-	-	-	$5,1 \times 10^{-8}$

Analisando as curvas I-V traçadas na Figura 4-12, bem como os parâmetros tabelados acima, percebe-se que o desempenho da célula é maioritariamente afetado pela presença de resistência série, reduzindo o fator de forma e o rendimento. As curvas EQI obtidas evidenciam a presença de problemas no volume da célula na zona do defeito, comprovado pelo baixo comprimento de difusão determinado nesta região (135 μm), comparativamente com o determinado para regiões de luminescência normal (625 μm). Posto isto, os resultados parecem refutar a ideia inicial de que a origem do defeito se encontra na metalização da célula. A hipótese de existência de curto-circuitos localizados é também excluída pela imagem termográfica, uma vez que não se observa a presença de *hotspots*. Por fim, contrariamente ao previsto, nas imagens ReBEL não se observa qualquer tipo de defeito na zona em estudo. A falta de um conhecimento mais aprofundado sobre a informação contida nas imagens ReBEL, juntamente com a informação reunida sobre este defeito, não permite uma conclusão precisa da sua origem.

A célula P1, caracterizada na Tabela 4-1, destacou-se pela presença de uma heterogeneidade de particular interesse, uma vez que esta se apresentava visível tanto na imagem EL em polarização direta, como nas imagens ReBEL e de termografia. Deste modo, a célula P1 foi submetida ao mesmo tipo de caracterização que a célula F2.

A Figura 4-13 apresenta o esquema de corte aplicado na célula, tendo-se isolado a célula P1_1a com recurso ao disco diamantado. Na aquisição da imagem EL da célula P1_1a, apresentada na Figura 4-13 à direita, utilizou-se um tempo de exposição de 3 min com corrente de 0,5 A. Nesta

célula, o defeito em estudo corresponde à região assinalada a azul claro, tendo sido comparado, em termos de EQI e comprimento de difusão, com a região vizinha de luminescência normal, assinalada a azul-escuro.

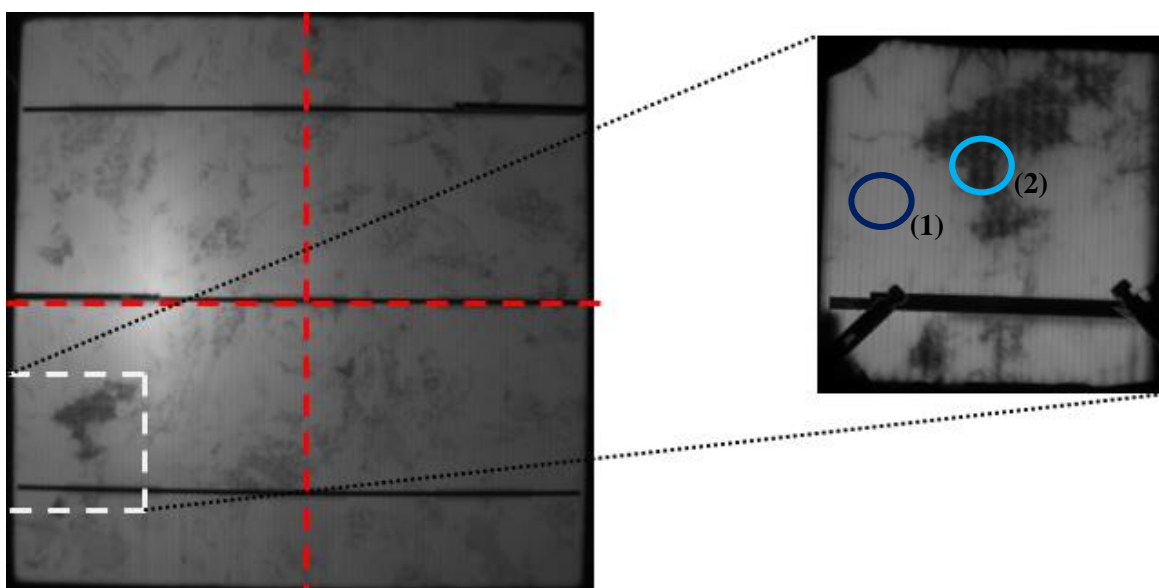


Figura 4-13: Esquema de corte aplicado à célula P1 e destaque, à direita, da região P1_1a.

A Figura 4-14 apresenta o traçado da curva I-V iluminada comparada com a curva obtida pelo Suns-Voc, bem como o gráfico de eficiência quântica interna obtido para os pontos 1 e 2 da célula P1_1a. Os parâmetros extraídos da curva I-V iluminada, curva I-V no escuro e do Suns-Voc encontram-se tabelados de forma resumida na Tabela 4-8.

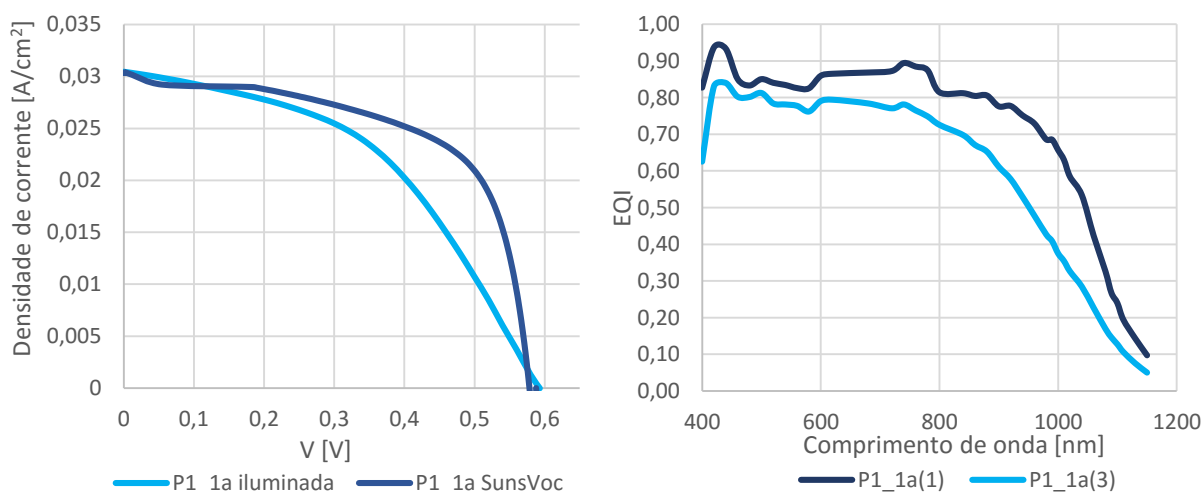


Figura 4-14: Curvas I-V provenientes do simulador solar e do Suns-Voc e curva EQI para dois pontos da célula P1_1a.

Tabela 4-8: Parâmetros retirados das curvas I-V da célula P1_1a.

	V_{mp} [V]	J_{mp} [A/cm ²]	V_{oc} [V]	J_{sc} [A/cm ²]	FF	η [%]	R_s [Ω .cm ²]	R_p [Ω .cm ²]	J_0 [A/cm ²]
I-V S.solar	0,36	0,023	0,59	0,030	0,46	8,25	8,89	83,94	-
I-V Suns-Voc	0,47	0,023	0,58	-	0,62	10,85	1,57	220,70	-
I-V escuro	-	-	-	-	-	-	-	-	$4,8 \times 10^{-6}$

A deformação da curva I-V, observada no gráfico da Figura 4-14, deve-se tanto à presença de resistência série na célula como às baixas resistências de curto-circuito registradas. Tal já era expectável, uma vez que a imagem de termografia registava a presença de um forte *hotspot* na região do defeito, sugerindo a presença de um curto-circuito. Por outro lado, o aparecimento deste defeito como uma zona mais escura na imagem EL sugere a presença de um centro de recombinação não radiativa. Consequentemente, registaram-se comprimentos de difusão mais reduzidos nesta região, cerca de 111 μm , comparativamente com as regiões vizinhas, cerca de 476 μm . Este efeito pode ser observado na análise da curva de eficiência quântica interna medida para o ponto 1 e ponto 2 da célula. Comparando as medidas efetuadas nos dois pontos, registou-se um decréscimo global da EQI na zona do defeito, com especial impacto nos comprimentos de onda mais elevados, apontando para problemas no volume.

Estes resultados vão ao encontro do observado nas imagens ReBEL da célula P1 (Tabela 4-1). Através destas, foi atribuído ao defeito em estudo a classificação do tipo II. Esta classificação pressupõe a presença de um centro de recombinação, resultante de precipitados que contêm metais que se encontram nas fronteiras de grão do silício multicristalino. Neste caso, a existência de aglomerados de impurezas está na origem de dois efeitos: recombinação de SRH com consequente aumento do J_0 e diminuição do comprimento de difusão, e curto circuito entre a base e o emissor provocado pela presença de impurezas metálicas nas fronteiras de grão. A presença do curto circuito acarreta uma redução da R_p e induz o aparecimento do *hotspot*, observado na imagem de termografia. Este *hotspot* é ainda agravado pela presença do centro de recombinação, que, ao produzir um aquecimento localizado, emite fortemente na região do infravermelho.

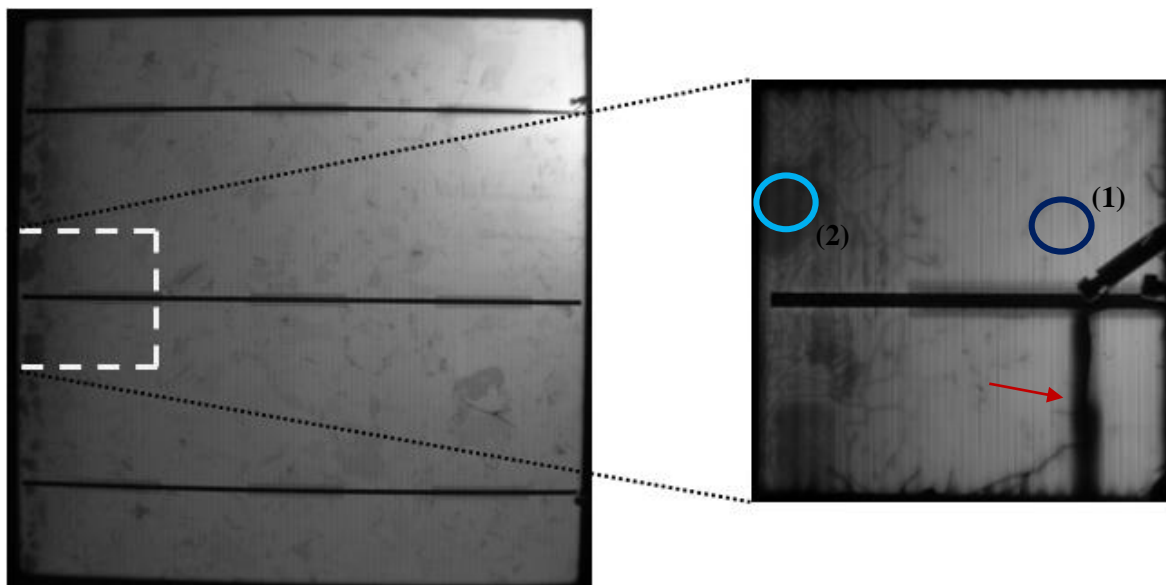


Figura 4-15: Esquema de corte aplicado à célula P4 e destaque, à direita, da região P4a

Por último, a célula P4, também previamente analisada na Tabela 4-1, foi submetida à mesma caracterização que as duas células anteriores, no entanto, esta não sofreu a ação do laser de corte. A Figura 4-15, à esquerda, identifica a zona isolada através do corte com disco diamantado.

À direita, apresenta-se em destaque a imagem EL da célula P4a, obtida com uma injeção de corrente de 0,5 A e tempo de exposição de 3 min. A linha de luminescência escurecida, identificada a vermelho, resultou do curto-circuito completo do *finger* durante o processo de aquisição de imagens EL. Nesta célula, o defeito em estudo é o assinalado a azul claro, região 1, tendo sido comparado com a região 2, de luminescência normal.

Os resultados obtidos através das curvas I-V e de resposta espectral, bem como os parâmetros calculados, encontram-se nos gráficos da Figura 4-16 e na Tabela 4-9.

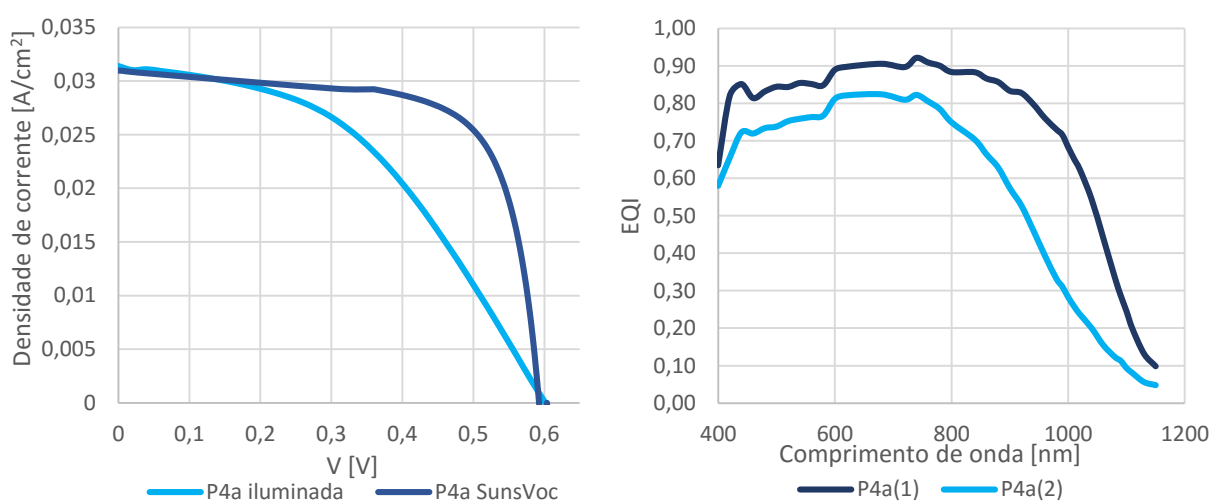


Figura 4-16: Curvas I-V provenientes do simulador solar e do Suns-Voc e curva EQI para dois pontos da célula P4a.

Tabela 4-9: Parâmetros retirados das curvas I-V da célula P4a

	V_{mp} [V]	J_{mp} [A/cm²]	V_{oc} [V]	J_{sc} [A/cm²]	FF	η [%]	R_s [Ω.cm²]	R_p [Ω.cm²]	J_0 [A/cm²]
I-V S.solar	0,36	0,023	0,60	0,031	0,45	8,42	9,46	133,06	-
I-V Suns-Voc	0,49	0,026	0,59	-	0,70	12,85	1,32	395,78	-
I-V escuro	-	-	-	-	-	-	-	-	$2,5 \times 10^{-6}$

A célula apresenta baixa resistência de curto-circuito e uma resistência série elevada. A origem destas resistências provém, possivelmente, do curto-circuito criado aquando da caracterização por EL e da exposição de três das quatro fases da célula ao corte efetuado. Os comprimentos de difusão calculados para a região 1 e 2 são, respetivamente, 435 μm e 63 μm identificando o defeito como uma zona de elevada recombinação. A imagem EL da célula P4, mostra que o defeito se estende ao longo de toda a sua lateral esquerda. Como indicado anteriormente, a disposição do defeito sugere que este tenha tido a sua origem no processo de fabrico da célula. Deste modo, foram levantadas as hipóteses de existência de problemas relacionados com o processo de difusão do fósforo no emissor, ou com uma deposição deficiente da camada anti-refletora e passivante. Observando a curva de eficiência quântica interna, embora se verifique alguma redução da EQI para comprimentos de onda baixos, a maior quebra verifica-se para comprimentos de onda mais elevados. Quando se faz difusão de nitreto de silício para além de se fazer o tratamento anti-refletor e passivante da superfície, também

ocorre passivação de volume por difusão de hidrogénio, no entanto, os resultados sugerem que o defeito tenha origem nas zonas mais profundas da célula e não na superfície frontal da mesma, afastando a hipótese relacionada com a camada anti-refletora. Contrariamente ao que se verificou no defeito em estudo da célula P1_1a (porção da célula P1), nesta célula a imagem termográfica não apresenta qualquer alteração na zona do defeito em estudo, como observado na tabela Tabela 4-1.

4.2 Identificação de defeitos via variação de temperatura em células solares multicristalinas

Como já referido na secção 3.3 desta dissertação, a eletroluminescência permite a distinção entre os defeitos intrínsecos e os defeitos extrínsecos, nas células solares de silício multicristalino. Segundo Fuyuki e Kitiyanan, a eletroluminescência destes defeitos varia consoante a temperatura da célula, verificando-se a atenuação dos defeitos intrínsecos quando a célula é exposta a temperaturas elevadas [30].

Partindo deste princípio, a célula P5 foi ligada em polarização inversa, a -18 V, com o sistema de refrigeração desligado, conduzindo ao aumento progressivo da sua temperatura. Uma vez atingidos os 90°C, iniciou-se o processo de arrefecimento até à temperatura ambiente, com recurso ao sistema de refrigeração. Durante este processo, a célula permaneceu ligada segundo uma corrente de 1 A, em polarização direta, e foram recolhidas imagens EL com 6 min de tempo de exposição aos 90°C, 70°C, 50°C e 21,5°C.

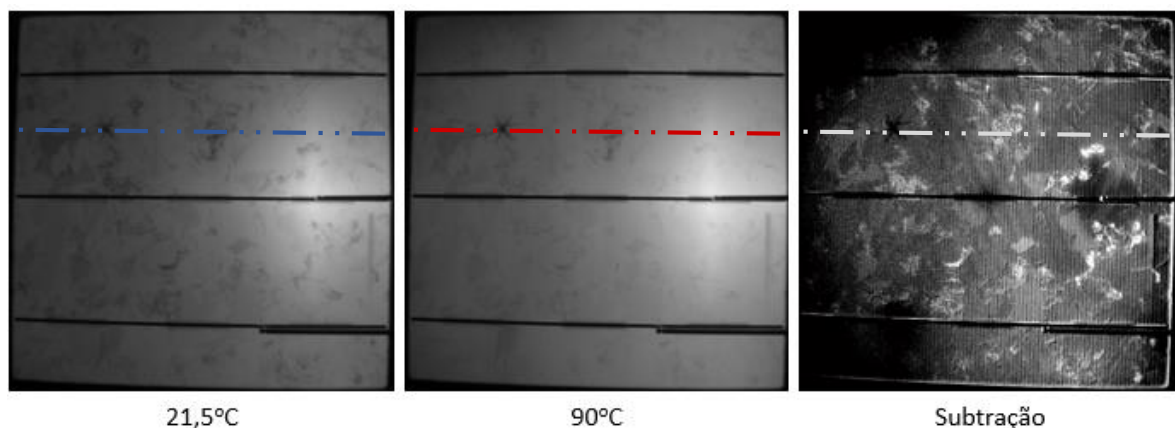


Figura 4-17: Imagens EL da célula P5 a 21,5°C e 90°C e subtração das duas imagens.

A Figura 4-17 ilustra a célula aos 21,5°C e 90°C, bem como a subtração ponto a ponto entre as duas imagens. Na imagem correspondente à subtração, as zonas mais claras correspondem às regiões da célula que sofreram a maior variação na intensidade de luminescência. Estas zonas correspondem a defeitos intrínsecos da célula, como fronteiras de grão.

Com o objetivo de traçar um gráfico que melhor represente a variação da intensidade EL, foi selecionada uma linha de *pixéis* de forma a abranger zonas de defeitos intrínsecos e extrínsecos. A região escolhida está identificada, para cada imagem, na Figura 4-17 a tracejado, correspondendo posteriormente aos respetivos perfis traçados no gráfico da Figura 4-18. Por observação do gráfico, verifica-se um crescimento global da intensidade de EL até ao *pixel* 1500, decrescendo a partir daqui. Este pico corresponde à zona de injeção de corrente e, mostra de forma bastante clara, as limitações existentes no sistema de medida de eletroluminescência no que diz respeito aos contatos que contactam a face superior da célula.

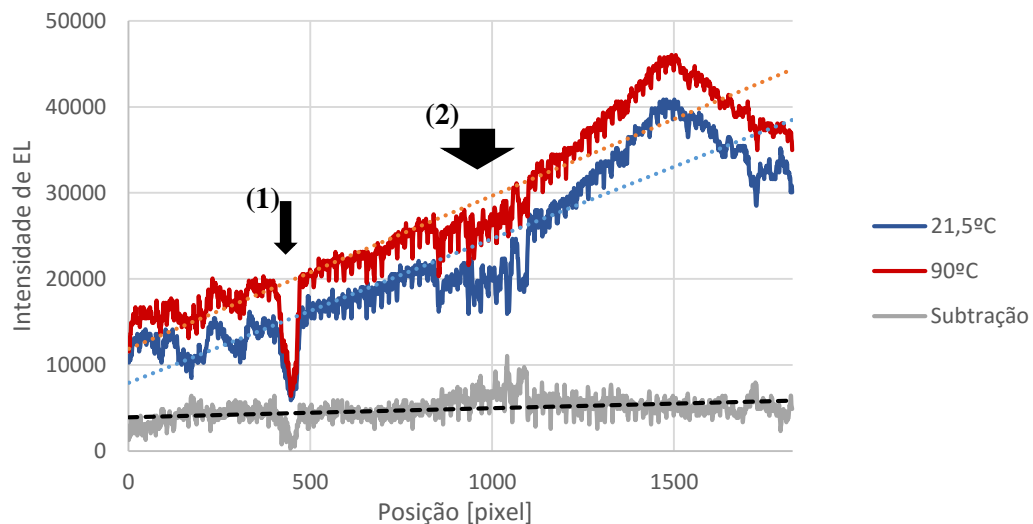


Figura 4-18: Variação da intensidade EL ao longo da linha de *pixels* identificada na figura anterior.

À temperatura ambiente, o defeito assinalado a 2 no gráfico, apresenta um desnível considerável relativamente ao valor médio para essa temperatura. Contrariamente, a 90°C, esse mesmo defeito sofre uma atenuação, apresentando valores de luminescências mais próximos do valor médio. Encontramo-nos assim na presença de um defeito intrínseco. Uma vez que a curva de subtração se obtém da subtração do perfil de 90°C pelo de 21,5°C, este defeito apresenta-se com uma intensidade superior aos valores médios, correspondendo às regiões mais claras na imagem de subtração da Figura 4-17.

Por outro lado, o defeito assinalado a 1 no gráfico, correspondente a uma fissura, apresenta sempre valores muito baixos de intensidade EL, não se verificando diferenças significativas entre o perfil traçado aos 21,5°C e 90°C. Na curva de subtração, este defeito identifica-se por valores de intensidade abaixo dos valores médios, correspondendo a zonas mais escuras na imagem de subtração.

5 Conclusões e trabalhos futuros

Numa primeira fase, o trabalho focou-se no desenvolvimento de um sistema de caracterização de eletroluminescência de células solares de dimensão industrial sendo, de seguida, orientado para o estudo da deteção e identificação de defeitos visíveis nas imagens EL. Este estudo foi complementado através do confronto com outras técnicas de caracterização, nomeadamente termografia, curvas I-V e curvas de resposta espectral.

O sistema é constituído por um fotodetector Si-CCD, do tipo consumidor, colocado no interior de uma caixa estanque à luz. As células são apoiadas num porta amostras, através do qual é feito o contacto inferior. Este é ainda dotado de um sistema de refrigeração e de sucção que controla a temperatura da célula e melhora o contacto entre a célula e a base. O contacto superior das amostras é feito com recurso a uma ponta de prova, que injeta corrente num único ponto da célula. Este constitui a principal limitação do sistema, uma vez que a célula não é excitada de forma uniforme em toda a área, produzindo zonas de luminescência distintas. Deste modo, como trabalho futuro, sugere-se o desenvolvimento de um sistema de contactos superiores que permita a injeção de corrente ao longo de todas as *busbars* da célula a caracterizar.

Durante o estudo de identificação de defeitos efetuado, as células foram sujeitas a dois tipos de corte: corte com laser e corte com disco diamantado. Ambas as técnicas utilizadas se revelaram bastante invasivas, no entanto, o uso do laser de corte verificou-se ser particularmente destrutivo, em especial quando aplicado sobre a *busbar*, devido à contaminação da célula com prata e à criação de grandes curto-circuitos entre a base e o emissor. Deste modo, expor as células ao efeito de um corte não é um procedimento recomendável, uma vez que, em ambas as técnicas, aumenta a recombinação de superfície e potencia o aparecimento de fissuras nos contornos da célula.

Verificou-se que a eletroluminescência é uma técnica de caracterização bastante prática e sensível à presença de defeitos em células solares de silício, fornecendo informação útil sobre as propriedades elétricas e do material. A comparação entre as imagens EL, ReBEL e termográficas de células mono e multicristalinas, permite identificar defeitos como fissuras, dedos cortados, curto-circuitos locais, problemas na metalização e centros de recombinação. Todos os defeitos mencionados são facilmente localizados nas imagens EL como zonas mais escuras ou heterogeneidades no padrão de luminescência. Nas imagens ReBEL, variando a tensão aplicada, é possível distinguir diferentes tipos de defeitos, no entanto, nem todos os defeitos visíveis na EL são visíveis nas imagens ReBEL, e vice-versa. Assim, como trabalho futuro, sugere-se um estudo mais aprofundado da informação contida nas imagens ReBEL, nomeadamente da correlação destas imagens com a imagem EL. Por fim, as imagens termográficas de células ligadas em polarização inversa permitem identificar zonas de perda de potência através do desenvolvimento de *hotspots*. Estas zonas, visíveis também nas imagens ReBEL, surgem de defeitos como fissuras, curto-circuitos e centros de elevada recombinação nas células de silício multicristalino, associados a aglomerados de impurezas metálicas em determinadas fronteiras de grão.

Nas imagens de EL das células de silício multicristalino torna-se particularmente difícil distinguir heterogeneidades relacionadas com defeitos extrínsecos. Deste modo, a identificação de defeitos através da subtração de duas imagens EL da célula, obtidas a diferentes temperaturas, provou ser um método bastante eficaz no mapeamento dos defeitos, podendo ser utilizado no processo de controlo de qualidade das células solares.

Embora a eletroluminescência permita mapear de forma bastante rápida e clara os defeitos existentes nas células, torna-se muitas vezes difícil identificar a sua origem. Assim, a determinação das curvas I-V e de resposta espectral permitem um estudo mais detalhado do defeito em questão, tendo-se mostrado bastante úteis no complemento do estudo de alguns defeitos.

6 Referências bibliográficas

- [1] APREN, “Impacto macroeconómico do setor da eletricidade de origem renovável em Portugal,” 2014. [Online]. Available: http://www.apren.pt/fotos/editor2/impacto_fer__relatorio_final_20140930.pdf. [Acedido em Novembro 2015].
- [2] REN, “Dados técnicos 2014,” 2014.
- [3] Y. Chu, “Review and Comparison of Different Solar Energy Technologies,” Global Energy Network Institute, 2011.
- [4] J. L. Gray, “The Physics of the Solar Cell,” em *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA, John Wiley & Sons, Ltd, 2003, pp. 62-110.
- [5] A. Goetzberger, J. Knobloch e B. Vob, *Crystalline Silicon Solar Cells*, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, Freiburg, John Wiley & Sons, 1994.
- [6] “Semiconductor Band Gaps,” [Online]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/tables/semgap.html>. [Acedido em Novembro 2015].
- [7] R. W. Waynant e M. N. Ediger, “Chapter 6: SEMICONDUCTOR LASERS,” em *Electro-Optics Handbook, Second Edition*, New York City, McGraw-Hill Companies, Inc, 2000, pp. 6.1-6.24.
- [8] G. Cook, L. Billman e R. Adcock, *Photovoltaic fundamentals*, U.S. Department of energy, 1995.
- [9] J. Silva, “Dopagem de fita de silício durante a cristalização a partir de uma zona fundida,” Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, 2009.
- [10] Circuits Today, “Understanding the PN Junction,” Julho 2014. [Online]. Available: <http://www.circuitstoday.com/understanding-the-pn-junction>. [Acedido em Outubro 2015].
- [11] D. H. Macdonald, “Recombination and Trapping in Multicrystalline Silicon Solar Cells,” Australian National University, May 2001.
- [12] J. Y. Lee, “Rapid Thermal Processing of Silicon Solar Cells - Passivation and Diffusion,” Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Freiburg im Breisgau, Alemanha, 2003.

- [13] D. L. Meier, J.-M. Hwang e R. B. Campbell, “The Effect of Doping Density and Injection Level on Minority -Carrier Lifetime as Applied to Bifacial Dendritic Web Silicon Solar Cells,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 35, pp. 70-79, 1988.
- [14] S. W. Glunz, R. Preu e D. Biro, “Chapter 1.16: Crystalline Silicon Solar Cells - State-of-the-art and Future Developments,” em *Comprehensive Renewable Energy*, Freiburg, Germany, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, 2012.
- [15] A. J. Bühler, “Determinação de parâmetros fotovoltaicos a partir de ensaios de curvas características sem iluminação,” Porto Alegre, 2007.
- [16] PVPerformance Modeling Collaborative, “Single Diode Equivalent Circuit Models,” [Online]. Available: <https://pvpmc.sandia.gov/modeling-steps/2-dc-module-iv/diode-equivalent-circuit-models/>. [Acedido em Novembro 2015].
- [17] M. Munoz, M. Alonso-García, N. Vela e F. Chenlo, “Early degradation of silicon PV modules and guaranty conditions,” em *Solar Energy*, vol. 85, Madrid, Elsevier, 2011, p. 2264–2274.
- [18] M. Zettl, O. Mayer, M. Lynass, M. Bucher, O. Stern, C. Heller e E. Mueggenburg, “Defect detection in photovoltaic modules using electroluminescence imaging,” em *27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, pp. 3374 - 3378, 2012.
- [19] J. Schmauder, R. Kopecek, R. Barinka, P. Barinkova, A. Bollar, D. Koumanakos, N. Otero e P. Romero, “First steps towards an automated repairing of solar cells by laser enabled silicon post-processing,” em *27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, pp. 1401 - 1404, 2013.
- [20] B. Ziebarth, M. Mrovec, C. Elsässer e P. Gumbsch, “Potential-induced degradation in solar cells: Electronic structure and diffusion mechanism of sodium in stacking faults of silicon,” *Journal of Applied Physics*, vol. 116, 2014.
- [21] J. Bauer, V. Naumann, S. Großer, C. Hagendorf, M. Schütze e O. Breitenstein, “On the mechanism of potential-induced degradation in crystalline silicon solar cells,” *P hys. Status Solidi RRL*, vol. 6, nº 8, pp. 331-333, 2012.
- [22] I. Rutschmann, “Power losses below the surface,” *Photon*, pp. 130-137, 2012.
- [23] V. Naumann, D. Lausch, A. Hähnel, J. Bauer, O. Breitenstein, A. Graff, M. Werner, S. Swatek, S. Großer, J. Bagdahn e C. Hagendorf, “Explanation of potential-induced degradation of the shunting type by Na decoration of stacking faults in Si solar cells,” em *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 120, Elsevier, 2014, p. 383–389.

- [24] National Renewable Energy Laboratory, [Online]. Available: http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg. [Acedido em Janeiro 2016].
- [25] C. Honsberg e S. Bowden, “PV Education,” [Online]. Available: <http://www.pveducation.org/pvcdrom>. [Acedido em Setembro 2015].
- [26] S. Bowden, V. Yelundur e A. Rohatgi, “Implied-Voc and Suns-Voc measurements in multicrystalline solar cells,” em *Photovoltaic Specialists, IEEE Conference - PVSC*, pp. 371-374, 2002.
- [27] Sinton Instruments, “Suns-Voc — Post-Diffusion Process Control,” 2011. [Online]. Available: <http://www.sintoninstruments.com/Sinton-Instruments-Suns-Voc.html>. [Acedido em Outubro 2015].
- [28] J. Serra, *Slides de apoio às aulas da Dispositivos Fotovoltaicos*, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 2014.
- [29] Second University of Naples, Department of Environmental Science, “Electroluminescence in photovoltaic cell,” *Physics Education*, pp. 511-513, Setembro 2011.
- [30] T. Fuyuki e A. Kitiyanan, “Photographic diagnosis of crystalline silicon solar cells utilizing electroluminescence,” *Applied Physics A*, vol. 96, pp. 189-196, 2009.
- [31] J. Crozier, E. v. Dyk e F. Vorster, “High Resolution Spatial Electroluminescence Imaging of Photovoltaic Modules,” Nelson Mandela Metropolitan University.
- [32] M. Köntges, M. Siebert, D. Hinken, U. Eitner, K. Bothe e T. Potthof, “Quantitative analysis of PV-modules by electroluminescence images for quality control,” em *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Hamburg, 2009.
- [33] O. Breitenstein, J. Bauer, K. Bothe, D. Hinken e J. Müller, “Luminescence imaging versus lock-in thermography on solar cells and wafers,” em *26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, pp. 1031-1038, 2011.
- [34] D. Lausch, K. Petter, R. Bakowskie, C. Czekalla, J. Lenzner, H. v. Wenckstern e M. Grundmann, “Identification of pre-breakdown mechanism of silicon solar cells at low reverse voltages,” *Applied Physics Letters*, vol. 97, 2010.
- [35] O. Breitenstein, J. Bauer, K. Bothe, W. Kwapil e D. Lausch, “Understanding junction breakdown in multicrystalline solar cells,” *Journal of applied physics*, vol. 109, 2011.

- [36] K. Bothe, K. Ramspeck, D. Hinken, C. Schinke, J. Schmidt, S. Herlufsen, R. Brendel, J. Bauer, J.-M. Wagner, N. Zakharov e O. Breitenstein, “Luminescence emission from forward- and reverse-biased multicrystalline silicon solar cells,” *Journal of Applied Physics*, vol. 106, 2006.
- [37] D. Mankovics, A. Klosek, C. Krause, T. Arguirov, W. Seifert e M. Kittler, “Luminescence of defects and breakdown sites in multicrystalline silicon solar cells,” *Physica status solidi*, vol. 209, p. 1908–1912, 2012.
- [38] S. Pingel, O. Frank, M. Winkler, S. Oaryan, T. Geipel, H. Hoehne e J. Berghold, “Potencial induced degradation of solar cells and panels,” em *35th IEEE - Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2817 - 2822, 2010.
- [39] Wiley and Sons Chichester, “Understanding Solar Cells,” [Online]. Available: <http://www.volker-quaschning.de/articles/pv-basics/index.php>. [Acedido em Outubro 2015].

Anexos

A.1: Introdução de defeitos por PID

Inicialmente pretendia-se que um dos principais focos de estudo desta dissertação fosse o estudo de identificação de defeitos induzidos por PID, no entanto, devido à avaria da fonte de alta tensão utilizada no projeto, o estudo teve que ser interrompido ainda numa fase muito preliminar do mesmo. Deste modo, a matéria aqui apresentada serve apenas como base para um trabalho futuro.

A estrutura montada para a indução de PID em células solares foi baseada no artigo “*Potencial induced degradation of solar cells and panels*”, de Pingel, et al., no qual descrevem um teste em que a cobertura frontal do painel é ligada ao polo positivo da fonte de alimentação e os contatos do painel ligados ao polo negativo, de forma a gerar uma diferença de potencial entre a célula e a cobertura de vidro [38]. Uma vez que se pretendia efetuar um estudo apenas ao nível da célula, fez-se uma adaptação ao sistema descrito no artigo. A Figura A1.1 apresenta a disposição da bancada onde foi montado o sistema.



Figura A1.1: Montagem utilizada na introdução de defeitos por PID.

A célula foi colocada sobre uma base de cobre e coberta por um vidro com uma moldura feita de folha de alumínio. O polo positivo da fonte de tensão foi ligado ao vidro e o polo negativo à base de cobre, provocando uma diferença de potencial de cerca de 1000 V. A corrente medida no amperímetro é muito reduzida.

O sistema manteve-se ligado primeiramente durante 10 h, numa célula monocristalina, e de seguida durante 30 h numa célula multicristalina. Imediatamente antes e após as células serem expostas a este sistema, foram feitas medidas de eletroluminescência, não se tendo registado alterações nas células. A terceira tentativa consistia numa exposição de 50 h ao sistema, no entanto, foi nesta fase que se deu a avaria e a interrupção do estudo.

A.2: Refletância da amostra de referência

Wavelength (μm)	Reflectance, P-Pol. (%)	Reflectance, S-Pol. (%)	Reflectance, Unpol. (%)
0,400	89,07136	93,78933	91,43034
0,410	88,80774	93,42069	91,11421
0,420	88,52519	92,99936	90,76228
0,430	88,29179	92,52687	90,40933
0,440	87,98225	92,06374	90,02299
0,450	87,75244	91,52691	89,63967
0,460	87,52466	90,99596	89,26031
0,470	87,20926	90,50298	88,85612
0,480	86,90604	89,99515	88,4506
0,490	86,65239	89,41649	88,03444
0,500	86,38189	88,84324	87,61256
0,510	86,13422	88,27232	87,20327
0,520	85,85282	87,7336	86,79321
0,530	85,60976	87,2296	86,41968
0,540	85,35072	86,70731	86,02902
0,550	85,09762	86,22494	85,66128
0,560	84,8264	85,73263	85,27952
0,570	84,62075	85,3155	84,96813
0,580	84,39825	84,8674	84,63282
0,590	84,14261	84,4914	84,317
0,600	83,8989	84,14633	84,02262
0,610	83,66407	83,81853	83,7413
0,620	83,39464	83,49504	83,44484
0,630	83,18318	83,18243	83,18281
0,640	82,90558	82,92914	82,91736
0,650	82,64881	82,67544	82,66213
0,660	82,40555	82,45438	82,42996
0,670	82,13366	82,21886	82,17626
0,680	81,85514	82,02377	81,93945
0,690	81,5567	81,81792	81,68731
0,700	81,25963	81,6201	81,43987
0,710	80,92132	81,42517	81,17324
0,720	80,59752	81,21696	80,90724
0,730	80,22575	80,95683	80,59129
0,740	79,82206	80,71245	80,26726
0,750	79,35933	80,40375	79,88154
0,760	78,90329	80,11851	79,5109
0,770	78,41282	79,80559	79,1092
0,780	77,88535	79,42665	78,656
0,790	77,35319	79,1008	78,22699
0,800	76,85588	78,78409	77,81998
0,810	76,47555	78,54236	77,50896
0,820	76,24898	78,49293	77,37095
0,830	76,21347	78,62721	77,42034
0,840	76,43433	78,9779	77,70611



Product Raw Data

Reflectance of Optics with UV-
Enhanced Aluminum Coating

DISCLAIMER: The data presented here are typical. Slight variations in performance data will occur from lot to lot. Please contact Technical Support with any questions regarding the use or reliability of this data. This data may be used in publications. However, please cite Thorlabs as the source.

Additional Information:

The coating's reflectance was measured as a function of polarization at a 45° AOI.

0,850	76,92554	79,61058	78,26806
0,860	77,644	80,44851	79,04625
0,870	78,59069	81,4645	80,02759
0,880	79,66661	82,58194	81,12428
0,890	81,0358	83,11478	82,07529
0,900	82,10733	84,31922	83,21328
0,910	83,13062	85,43358	84,2821
0,920	84,12079	86,43796	85,27938
0,930	85,04592	87,38124	86,21358
0,940	85,83932	88,1916	87,01546
0,950	86,58246	88,91738	87,74992
0,960	87,29733	89,55918	88,42826
0,970	87,94969	90,11513	89,03241
0,980	88,51609	90,63573	89,57591
0,990	88,98742	91,07141	90,02942
1,000	89,4175	91,44134	90,42942
1,010	89,84692	91,81805	90,83249
1,020	90,22443	92,16541	91,19492
1,030	90,56187	92,44777	91,50482
1,040	90,87738	92,71632	91,79685
1,050	91,14518	92,99128	92,06823
1,060	91,37845	93,22883	92,30364
1,070	91,59394	93,4447	92,51932
1,080	91,8325	93,6633	92,7479
1,090	91,99532	93,81654	92,90593
1,100	92,15027	94,01025	93,08026
1,110	92,2922	94,21007	93,25113
1,120	92,41274	94,3473	93,38002
1,130	92,55851	94,49343	93,52597
1,140	92,66629	94,6586	93,66245
1,150	92,73012	94,81006	93,77009
1,160	92,83193	94,94768	93,88981
1,170	92,98456	95,07772	94,03114
1,180	93,09266	95,173	94,13283
1,190	93,16974	95,27107	94,2204
1,200	93,25407	95,37499	94,31453

A.3: Software da câmara CoolSamBa HR320

A figura A3.1 mostra a interface do *software* da câmara CoolSamBa HR320. As tabelas seguintes descrevem os parâmetros ajustáveis neste *software*.

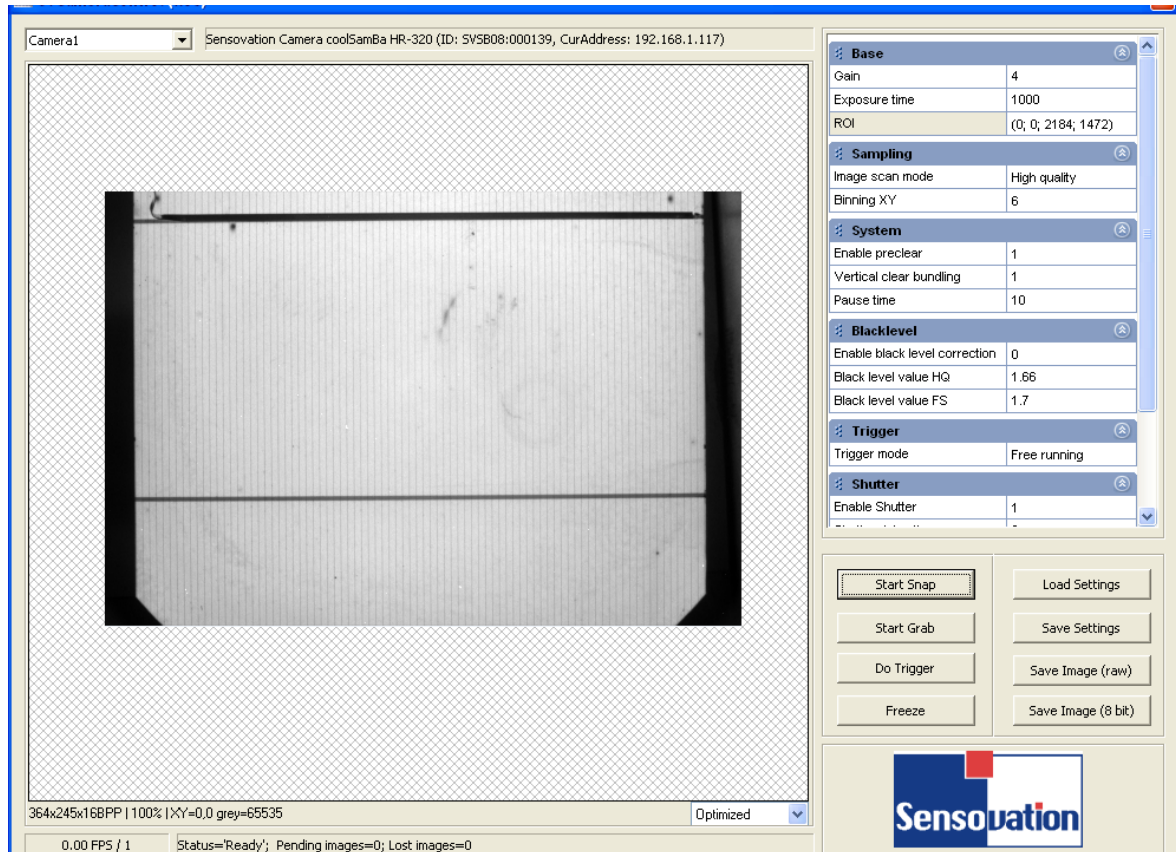


Figura A3.1: interface do *software* da câmara CoolSamBa HR320.

Tabela A3.1: Descrição dos comandos de captura de imagem.

Camera Control Buttons	Function
Start Grab	Starts continuous image acquisition
Start Snap	Starts acquisition of one single image
Do Trigger	Do not use. Software trigger mode is not supported
Freeze	Stops image acquisition
Load Settings	Stored image acquisition settings can be retrieved
Save Settings	Save the current image acquisition settings
Save image (raw)	Saves the current image in TIFF Format, with raw pixel values
Save image (8 bit)	Saves the current image in TIFF Format as shown

Tabela A3.2: Descrição dos parâmetros de captura.

Acquisition Parameters	Setting Range	Description
Gain	1; 2; 3; or 4	Setting 4 = default for unbinned images Setting 1-3 allow more dynamic range for binning
Exposure Time	0.001 to 3600001.0 milliseconds	Exposure time up to one hour (use at least 100ms exposure time for proper shutter operation)
ROI	(X1,Y1,X2,Y2)	Region of Interest, start and end coordinates (default = 0, 0, 2184, 1472)
Image Scan Mode	High Quality or Fast Scan	Noise-reduced, slow sensor readout. 16 Bit images. Fast image acquisition for focusing and alignment at reduced image quality. 12 Bit images.
Binning XY	1 to 16	Pixel Binning in x- and y direction. 1=unbinned (default) to 16 = 16x16
Enable Preclear	0 or 1	0=disable 1=enable (CCD is cleared before readout, default)
Vertical clear bundling	1 to 32	Vertical clear bundling 1= no bundling (default) to 32 = 32x bundling
Pause Time	0 to 3600001 milliseconds	Default = 10ms. Delay between image acquisitions in Grab mode
Enable black level correction	0 or 1	0=disable (default) black level correction 1=enable
Black level Value HQ	0.0 to 2.5	Factory calibrated. Increase / decrease black level offset for High Quality Mode
Black level Value FS	0.0 to 2.5	Factory calibrated. Increase / decrease black level offset for Fast Scan Mode
Trigger mode	Free running, External trigger	Free running (default) for software control, external trigger for control by hardware input
Enable Shutter	0 or 1	0=disable shutter (e.g. for dark image) 1=enable (default)
Shutter delay time	0.001 to 3600001.0 milliseconds	Default = 2ms. Set the delay to compensate for shutter actuation time. Note: The camera will integrate light for the Exposure Time + Shutter delay time.
Is temperature OK	0 or 1	Indicates if cooling temperature is in range (1=cooling temperature reached)
Enable test image	0 or 1	0=disable test image (default) 1=enable test image

A.4: Gráficos de refletância das amostras estudadas

A Figura A4.1 apresenta o gráfico de refletância das células F1_1, F2_3b, P1_1a e P4a, utilizado no cálculo da eficiência quântica interna, EQI.

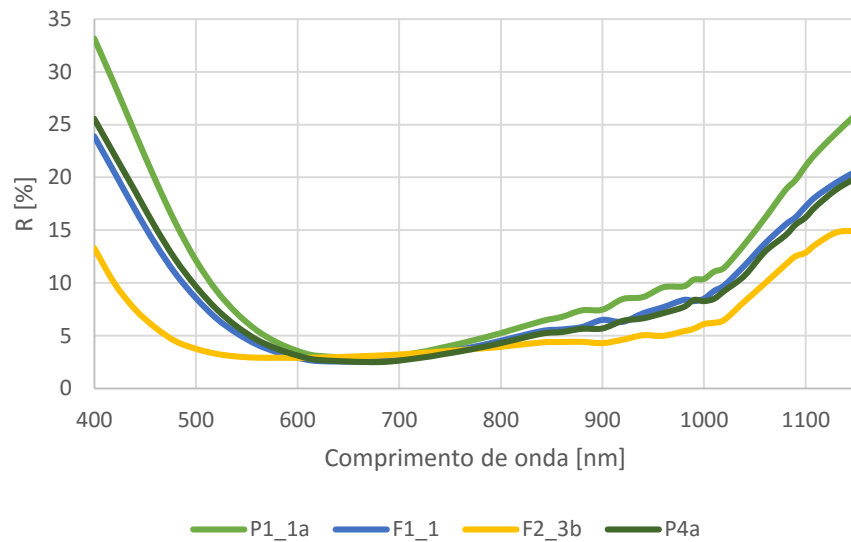


Figura A4.1: Refletância das células estudadas.